

	VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA Fakulta elektrotechniky a informatiky ČESKA ENERGETICKÁ AGENTURA	
---	---	---

STUDIE INSTALACE STACIONÁRNÍHO VYSOKOTEPLTNÍHO PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Ing. Bohumil HORÁK, Ph.D.

Ing. Zbyszek SZELIGA, Ph.D.

Ing. Miroslav KOPŘIVA

Katedra měřicí a řídicí techniky, Katedra elektroenergetiky, FEI VŠB-TUO

Katedra energetiky, FS VŠB-TUO

Anotace: Studie předkládá přehled o technologiích palivových článků. Seznamuje se základními typy, rozdělení a základními technickými parametry. Jádro studie se zabývá vysokoteplotními palivovými články s pevnými oxidy (SOFC) a jejich aplikacemi pro kogenerační výrobu elektrické energie a tepla. Závěr studie seznamuje s problematikou využití vysokopotenciálního tepla spalin SOFC a možnostmi aplikace v podobě záměru budoucí realizace pilotního systému vysokoteplotního palivového článku v podmínkách VŠB-TU Ostrava.

Studie je určena okruhu technické veřejnosti zabývající se oblastmi obnovitelných a alternativních zdrojů energií a jejich využití formou kogenerační výroby elektrické energie a tepla.

Publikace je určena pro poradenskou činnost a je zpracována v rámci Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2005-část A.

Ostrava, listopad 2005

OBSAH

OBSAH	2
1 ÚVOD	5
1.1 Úvod do palivových článků	5
1.1.1 Palivové články - jedna z možných cest řešení	6
1.1.2 Stručné shrnutí stávajícího stavu produkce skleníkového plynu	7
1.1.3 Fosilní paliva	8
2 PRINCIP PRÁCE PALIVOVÉHO ČLÁNKU, OBECNÉ TEORETICKÉ	
ZÁKLADY	13
3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PALIVOVÉHO ČLÁNKU	17
3.1 Elektrické napětí palivového článku	17
3.2 Účinnost přeměny energie	20
3.2.1 Účinnost tepelného oběhu	20
3.2.2 Účinnost a účinnostní limity palivového článku	20
3.3 U-I (polarizační) charakteristika palivového článku, Výkon palivového článku	24
3.3.1 Aktivační ztráty	25
3.3.2 Průchod paliva elektrolytem paliva a vnitřní proud	28
3.3.3 Ohmické ztráty	30
3.3.4 Přeprava hmoty a koncentrační ztráty	31
3.3.5 Sloučení jevů způsobujících pokles napětí palivového článku	32
4 VYVEDENÍ ENERGIE Z PALIVOVÉHO ČLÁNKU	34
4.1 Úvod	34
4.2 Regulace stejnosměrného napětí	35
4.2.1 Spínací zařízení	35
4.3 Střídače	41
4.3.1 Jednofázové střídače	41
4.3.2 Třífázové střídače	46
4.4 Elektrické motory	49
4.4.1 Obecný úvod	49
4.4.2 Indukční motor	50

4.4.3	Bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC)	52
4.4.4	Spínané reluktanční motory (SRM).....	54
4.5	Hybridní systém palivový článek/baterie či palivový článek/kondenzátor	57
5	TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ, ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ A POPIS ZÁKLADNÍCH FUNKČNÍCH PRINCIPŮ, PROVOZNÍ TEPLoty	59
5.1	Kritéria dělení palivových článků.....	59
5.2	Stručný popis jednotlivých typů palivových článků	61
5.2.1	Alkalické palivové články (AFC – Alkaline Electrolyte Fuel Cells)	61
5.2.2	Membránové palivové články (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cells).....	62
5.2.3	Přímé metanolové palivové články (DMFC – Direct Methanol Fuel Cells).63	
5.2.4	Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cells)	64
5.2.5	Palivové články s tavenými karbonáty (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cells)	64
5.2.6	SOFC - Palivové články s pevnými oxidy	65
5.3	Zhodnocení parametrů jednotlivých palivových článků.....	66
6	PALIVOVÉ ČLÁNKY S PEVNÝMI OXIDY (SOFC – SOLID OXIDE FUEL CELLS) 67	
6.1	Základní popis palivových článků s pevnými oxidy.....	67
6.2	Popis základních stavebních prvků článku SOFC.....	70
6.2.1	Elektrolyt.....	70
6.2.2	Anoda.....	71
6.2.3	Katoda	72
6.3	Konstrukční uspořádání modulu katoda, anoda a elektrolyt.....	72
6.4	Uspořádání jednotlivých konceptů konstrukcí modulů palivových článků typu SOFC do stacků.....	73
6.4.1	Trubkové uspořádání.....	74
6.4.2	Planární uspořádání SOFC palivového článku	77
6.5	Navazující externí technologie palivových článků SOFC	83
6.5.1	Parní reformování paliv.....	83

7	JEDNOTKY SOFC O VÝKONECH ŘÁDU JEDNOTEK AŽ DESÍTEK KW URČENÉ PRO KOGENERAČNÍ VÝROBU TEPLA A ELEKTRICKÉ ENERGIE V OBYTNÝCH BUDOVÁCH.....	87
7.1	Sulzer Hexis SOFC	87
7.2	Demonstrační systém SOFC typ Beta 5 kW fy Siemens	90
8	JEDNOTKY O VÝKONECH ŘÁDU DESÍTEK AŽ STOVEK KW.....	95
8.1	Sofistikované systémy s vysokoteplotními palivovými články.....	95
9	MOŽNOSTI VYUŽITÍ VYSOKOPOTENCIÁLNÍHO TEPLA SPALIN SOFC PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	98
9.1	Zapojení do vytápěcí soustavy obytné budovy, rodinného domku.....	98
9.2	Aplikace vysokoteplotních palivových článků do vytápěcích soustav obytných celků.....	101
9.3	Aplikace Rankin-Clausiova oběhu	101
10	STUDIE MOŽNOSTÍ APLIKACE DEMONSTRAČNÍ LABORATORNÍ JEDNOTKY S PALIVOVÝM ČLÁNKEM TYPU SOFC V LABORATOŘI PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ VŠB-TU OSTRAVA.....	103
10.1	Implementace laboratorní jednotky SOFC do systému vytápění, resp. přípravy TUV, pro budovu Krásnopolská č.p. 86	103
10.2	Implementace jednotky SOFC do elektrizační soustavy.....	109
10.2.1	Současný stav elektroinstalace objektu Krásnopolská č.p. 86	109
10.2.2	Předpokládané umístění jednotky (systému) s SOFC, její připojení do vnitřní elektrické sítě objektu Krásnopolská č.p. 86 a využívání.....	110
	POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY.....	116
	PUBLIKACE AUTORSKÉHO TÝMU K DANÉ PROBLEMATICE.....	118

1 ÚVOD

1.1 Úvod do palivových článků

Palivové články se začínají, jakožto environmentálně přijatelná technologie, dostávat do oblasti zájmu odborné i laické veřejnosti. Důvody tohoto zájmu vyplynou z dalších statí této publikace, v úvodu je však třeba se zmínit o těch nejpodstatnějších.

Technologie palivových článků je považována za ekologicky přijatelnou alternativu k stávajícím zdrojům elektrické a tepelné energie, pracujících převážně na principu spalování fosilních paliv. Jedná se o technologii přímé přeměny energie chemické na elektrickou, technologii se zanedbatelnou produkcí emisí. Uvádí se, a ne vždy správně, technologií s nulovými emisemi. Tento aspekt je však třeba hodnotit globálně s na původ paliva.

Díky vysoké účinnosti přeměny energie je i tak bezesporu technologií s nižšími specifickými emisemi a to skleníkového plynu CO_2 , nemluvě o dalších emisích jako mechanické částice, NO_x , SO_x , ad., a to hlavně porovnáváme-li klasické spalovací zařízení, spalující například zemní plyn, a palivový článek provozovaný na zemní plyn. V případě, že hodnotíme pod úhlem emisí palivový článek, jehož palivovým plynem je vodík vyrobený např. pomocí obnovitelných zdrojů, pak lze mluvit o technologii vykazující nulové emise, jejíž odpadní látkou je čistá voda.

Takže emise a účinnost přeměny energie jsou základními motivy pro razantní rozvoj této technologie a to zejména v posledním desetiletí. Technologií rozvíjenou pro mobilní i stacionární aplikace využívané především v energetickém a dopravním sektoru.

Palivové články je možno rozdělit do několika základních, dnes známých principiálních provedení. Kritériem rozdělení je typ elektrolytu resp. pracovní teplota článku.

Pro nižší výkony jsou ve svém použití dominantní palivové články membránové, označované zkratkou PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells – viz. kapitola 5, část 5.2.2). Dnes se již první jednotky tohoto typu dostávají do komerčních aplikací a to především do aplikací mobilních. Jejich aplikovatelnost, jakožto zdroje elektrické energie, je především pro přenosné elektrické spotřebiče např.: notebooky a dále v automobilovém průmyslu jako generátory elektrické energie pro hnací agregát automobilů, či jako malé kogenerační jednotky pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. Úroveň tepla je, jak bude dále v této publikaci pojednáváno, nízkopotenciální. Neočekává se vývoj těchto článků pro větší výkony.

Za první vlaštovky v komerčních aplikacích palivových článků vyšších výkonů je možno pokládat články typu PAFC (palivové články s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné), kde jsou již komerčně nabízeny a prodávány jednotky o výkonu 200kW. Tato technologie palivových článků je zdaleka nejvíce pokročilou ve svém vývoji a svých aplikacích. Lze však říci, že z hlediska jejího dalšího vývoje a zdokonalování, je již technologií s malým potenciálem pro budoucnost. Problémy provázející jednotky tohoto typu se zdají být pro tuto technologii, ve srovnání s jinými principy, do budoucna eliminující.

Další technologie palivových článků již taktéž začínají z fáze pokusných pilotních zařízení přecházet do fáze prvotních blokových jednotek polokomerčního nasazení. Zdá se, že

technologie PAFC bude brzy vytlačena technologií SOFC, kde elektrolytem jsou pevné oxidy. Nasazení typu SOFC se týká především stacionárních aplikací a to zejména v decentralizované výrobě tepla a elektrické energie. Tato cesta se zdá být velice perspektivní. Technologie SOFC se jeví pro tuto zmíněnou kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie jako velice vhodná, neboť patří do skupiny vysokoteplotních palivových článků (pracuje při teplotách 800÷1000°C). Vysoká teplota odpadních plynů přímo vybízí k využití jejich vysokopotenciálního tepla a to pro zmíněné využití v systémech vytápění a TUV, nebo u větších výkonů pro sestavování sofistikovaných blokových celků skládajících se z parního cyklu s možnou kombinací se spalovací turbínou. Celková elektrická účinnost těchto systémů je vysoko nad účinností klasických elektrárenských bloků.

Tato publikace se zabývá možnostmi aplikace systému SOFC, jakožto demonstrační laboratorní jednotky, v laboratoři palivových článků VŠB-TU Ostrava. V publikaci se pak autoři snaží přiblížit čtenáři samotné principy technologie palivových článků v obecných rysech, dále se zaměřují na teoretické základy technologie SOFC. V publikaci jsou shromážděny poznatky o vývoji a současném stavu ve vývoji SOFC jednotek, konstrukční a funkční materiály, jednotlivé vyvíjené koncepce konstrukčního provedení a uspořádání. V neposlední řadě jsou zde popsány polokomerční SOFC bloky, které již začínají být některými výrobci nabízeny v polokomerčních aplikacích.

Tato pasáž slouží jako výchozí zdroj dat pro posouzení možností aplikace vybrané varianty systému SOFC.

Poslední část této publikace se zabývá vlastní studií integrace jednotky SOFC odpovídajícího výkonu do energetické soustavy zvolené budovy, laboratoře. Jsou zde zohledněny aspekty laboratorního provozu této jednotky a její spolupráce se stávajícími energetickými celky.

1.1.1 Palivové články - jedna z možných cest řešení

Před vlastním studiem technologie palivových článků a navazujících vodíkových technologií, by bylo vhodné zmínit se o globální situaci ve spotřebě energií, předpokládaných trendech a prognózách spotřeby energií a získat základní přehled o vlivu současných technologií, obzvláště jejich emisí, na místní i globální ekosystém.

Technologie palivových článků je v současnosti, ve srovnání se stávajícími systémy spalujícími fosilní paliva, technologií finančně velmi nákladnou. Je to dáno především tím, že se prozatím jedná o kusovou výrobu. Značná je taktéž materiálová náročnost.

Dalším aspektem je životnost daných systémů. Je však nezbytně nutné dívat se na tuto technologii a její možný přínos pod úhlem budoucích globálních změn, které pravděpodobně nastanou, a to jak z hlediska emisí z technologií spalujících fosilní paliva (emise skleníkových plynů a následně zvyšování skleníkového efektu díky těmto antropogenním vlivům), tak i postupného vyčerpávání zásob fosilních paliv.

Po analýze a studiu těchto dat začíná být jasný důvod úsilí vynakládaného do výzkumu a vývoje palivových článků a pilotních aplikací této technologie.

Technologii palivových článků je nutno srovnávat s technologiemi, které jsou používány především v sektoru energetickém a dopravním, kde systémy s palivovými články mohou být náhradou za technologie stávající. V prvním případě je to především výroba elektrické energie v energetických centrálách spalujících fosilní paliva, v druhém potom technologie spalovacích motorů a to jak v sektoru dopravním tak i energetickém. V obou případech jde o technologie přeměn energií získaných spalováním fosilních paliv.

Základní důvod rapidního nárůstu zájmu o technologii palivových článků je nutno hledat především ve dvou již zmíněných aspektech, ve kterých má tato technologie oproti příbuzným klasickým technologiím obrovskou výhodu. Za prvé, je to vyšší účinnost přeměny energie chemické na elektrickou (jedná se o přímou přeměnu chemické energie paliva na energii elektrickou) a za druhé, nesrovnatelně nižší, ne-li nulové (závisí na typu palivových článků a používaném palivu) emise škodlivých plynů do atmosféry, a to jak těch dnes monitorovaných základních (NO_x , SO_2 , CO , a TZL), tak i dalších, především plynů skleníkových, vznikajících spalováním fosilních paliv.

1.1.2 Stručné shrnutí stávajícího stavu produkce skleníkového plynu

Spalování fosilních paliv v klasických energetických blocích vede samozřejmě k tvorbě emisí skleníkového plynu CO_2 , jenž je nutným produktem oxidace uhlíku, a vývinu dalších nebezpečných plynů. Nutnost snižování těchto emisí je zřejmá. Problém „klasických emisí“ je především otázkou paliva, vlastní technologie spalování a dále pak otázkou opatření ve vlastních technologiích, tj. opatřeních primárních v samotném spalovacím procesu a opatřeních sekundárních, tj. obecně řečeno čištění spalin.

Ovlivnění emisí CO_2 se tedy pak již jeví především jako otázka podmíněná vlastní účinností přeměny energií. Účinnost přeměny energie je (tedy) přímo odzrcadlena (možno odvodit přímo ze) ve specifických emisích plynů, emisích vztažených na jednotku vyrobené energie.

Samozřejmě je nezbytně nutné zmínit se i o možných dalších opatřeních týkajících se snižování emisí CO_2 , jako je např.: separace CO_2 ze směsi výfukových plynů a jeho následné skladování, ad.

Spalování ropných fosilních paliv ve spalovacích motorech v dopravním sektoru přispívá do značné míry k celkovým emisím zmíněných skleníkových plynů. Velkým problémem je též s místními emisemi výfukových plynů z dopravních prostředků, a to hlavně v městských aglomeracích.

Uhelné elektrárny dnes produkují cca 25 % všech emisí oxidu uhličitého a cca 40 % oxidů dusíku a síry. Přibližně 25 % veškerých skleníkových plynů pochází z provozu automobilů.

Spálením 1 l benzínu v automobilu se do okolního prostředí uvolní cca 2,5 kg CO_2 . V současné době je ve světě v provozu cca 700 miliónů automobilů. Díky předpokládanému nárůstu, především v rozvojových zemích, má být 1 miliarda automobilů překročena mezi lety 2015 - 2020, prognózy pro rok 2030 předpokládají 1,6 miliardy automobilů. Při tomto rozvoji silniční dopravy a předpokládané nutnosti zvýšení výroby energií by v tomto období mělo být uvolňováno do ovzduší přibližně dvojnásobné množství CO_2 než dnes.

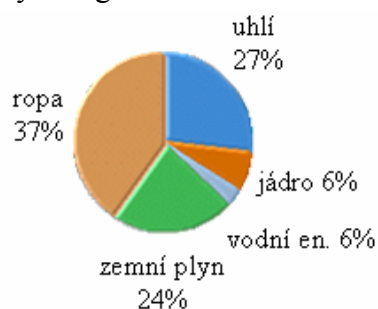
Zvyšování spotřeby fosilních paliv vede samozřejmě ke zvyšování emisí skleníkových plynů. Problematika redukce dalších škodlivých plynů ze spalování fosilních paliv v energetických blocích je otázkou investic do následných technologií týkajících se primárních i sekundárních opatření.

Přes všechny technologie čištění spalin vede zvyšování spotřeby fosilních paliv k absolutnímu zvyšování emisí nežádoucích plynů.

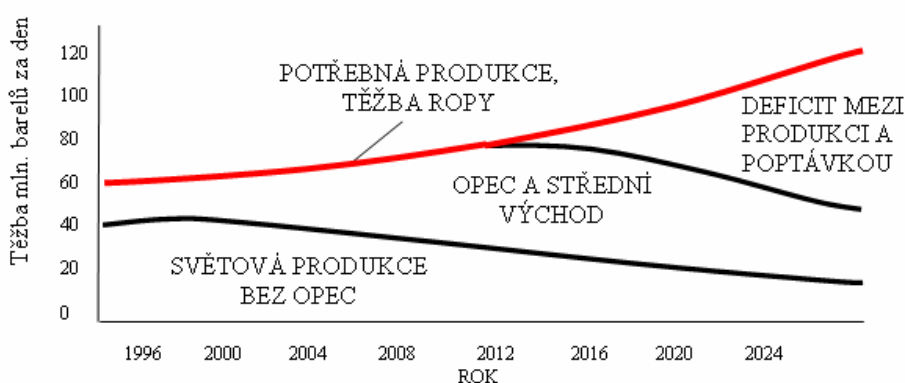
Otázka emisí je tedy jednou ze zásadních a týká se nás již dnes.

1.1.3 Fosilní paliva

V dlouhodobé perspektivě je třeba se zajímat o vlastní zásoby fosilních zdrojů energie. Většina pramenů uvádí, že 90% potřeby energie je v současnosti kryto spalováním fosilních paliv, jimiž jsou uhlí, plyn a ropné produkty. Při předpokladu spotřeby těchto energetických zdrojů na úrovni posledních let, jsou například zásoby zemního plynu a ropy na cca. 50 let. V případě uhlí je celosvětová předpokládaná zásoba na cca. 200 let. Dohromady pokrývá ropa a zemní plyn asi 60% světové potřeby energie.



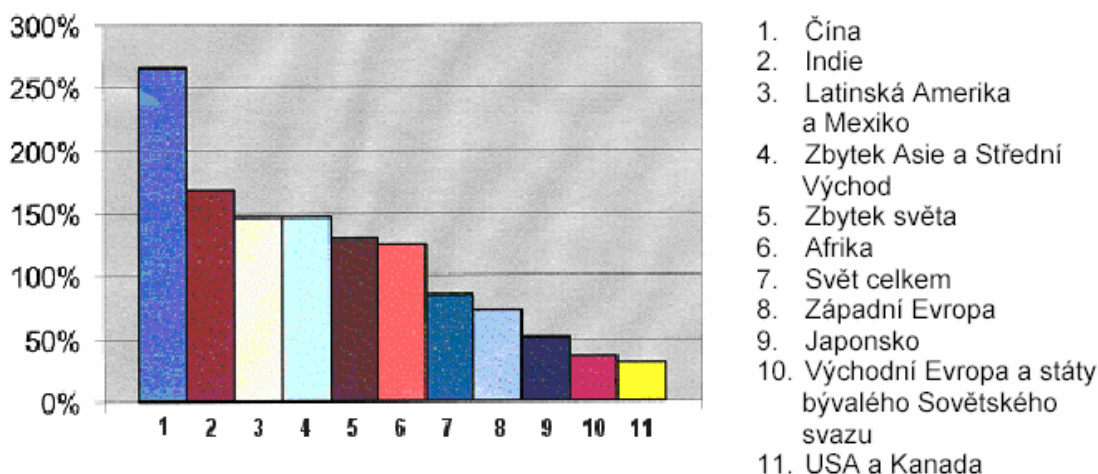
Obrázek 1-1 Podíl spotřeby energií dle zdrojů energií – svět 2003.



Obrázek 1-2 Prognóza vývoje těžby ropy vs. nárůst poptávky a spotřeby.

Asi polovina známých zdrojů, ložisek fosilních paliv, již byla během posledních 100 let vyčerpána, a vyvstává tedy morální otázka, zda současné generace mají právo vyčerpat další nezanedbatelnou část těchto zdrojů, a je li toto z pohledu dalších generací fér, ...

Dále je nad míru zajímavé sledovat prognózy spotřeby energetických zdrojů při předpokládaném růstu spotřeby energií v rozvojových zemích...viz. obr.č.1.3.



Obrázek 1-3 Prognóza nárůstu spotřeby energií do roku 2020 (ČEA – zpráva Enviros, s.r.o.).

Zaměřme se dále na srovnání lokálních spotřeb energií ve světovém měřítku, z níž vyplyne základní předpokládaný globální trend ve spotřebě fosilních paliv. Toto srovnání dává velice zajímavé výsledky, a to především budeme-li se zajímat o rozdělení světové spotřeby, a dále o zdroje energií a ekonomický a společenský potenciál růstu jednotlivých oblastí.

Existuje prozatím značná nerovnováha ve spotřebě energií ve vysoce rozvinutých zemích a zbytku světa, 17% lidstva spotřebovává 62% celkových energií! Je jasné, že balík spotřeby energií bude ve vysoce rozvinutých zemích mírně narůstat, možná snad i stagnovat. Především však je nutno se zamýšlet nad dalším vývojem, a tím i zvyšováním spotřeby energií ve státech, které jsme si zvykli nazývat rozvojovými.



17% obyvatel = obyvatelé severní polokoule



62% energie = energie spotřebovávaná obyvateli severní polokoule

Obrázek 1-4 Spotřeba primárních energetických zdrojů severní polokoule a zbytku, převážně rozvojového, světa vs. velikost dané populace.

S postupujícím rozvojem států, jako jsou Čína a Indie, bude celková světová spotřeba energií rapidně stoupat. Již dnes je možné pozorovat výkyvy v ceně ropy a jejích produktů způsobené dynamicky se rozvíjející ekonomikou Číny a tím i poptávkou z její strany.

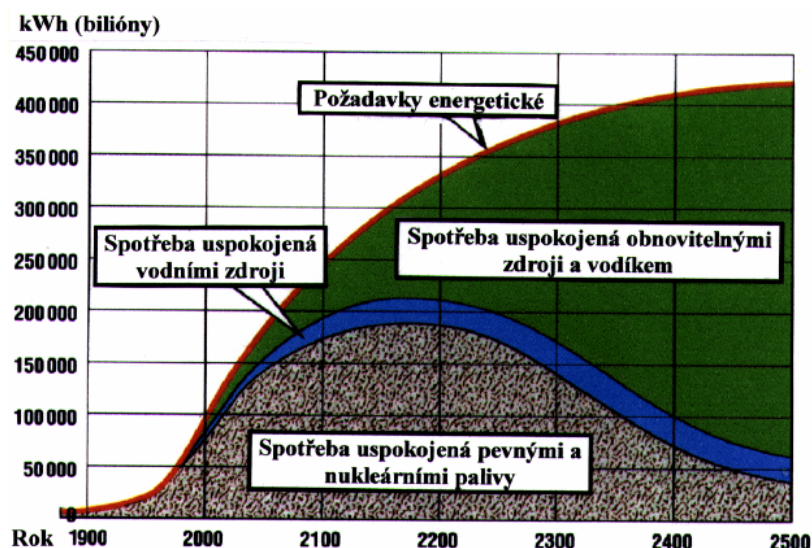
Pravděpodobně jen malý počet lidí žijících v „rozvinuté“ části světa si troufnou tvrdit, že lidé z rozvojových zemí se musí vzdát zvyšování své životní úrovně „nepoužitím“ pro ně nutných technologií, jejichž nasazování bude zrychleně kopírovat vývoj, který probíhal v rozvinutých zemích. Tím chci říci, že jsou a budou budovány technologie, jež berou malý

ohled na produkci emisí skleníkových plynů a dalších škodlivých látek. Již teď Čína produkuje podobné množství skleníkových plynů jako USA a Evropa dohromady.

Je otázkou, zda vyspělé země mohou po těchto zemích požadovat jinou cestu vývoje, aniž by sami nabídly schůdnou alternativní cestu. Tyto technologie přece vedly k vzrůstu životní úrovně „starého světa“, a dosavadní emise byly a jsou jeho zátěží.

Je tedy nutné, aby vyspělé státy investovaly úsilí a prostředky do vývoje nových technologií a dále je nabídly nejen pro svůj, především energetický a dopravní sektor hospodářství, ale i ostatnímu světu v globálním měřítku.

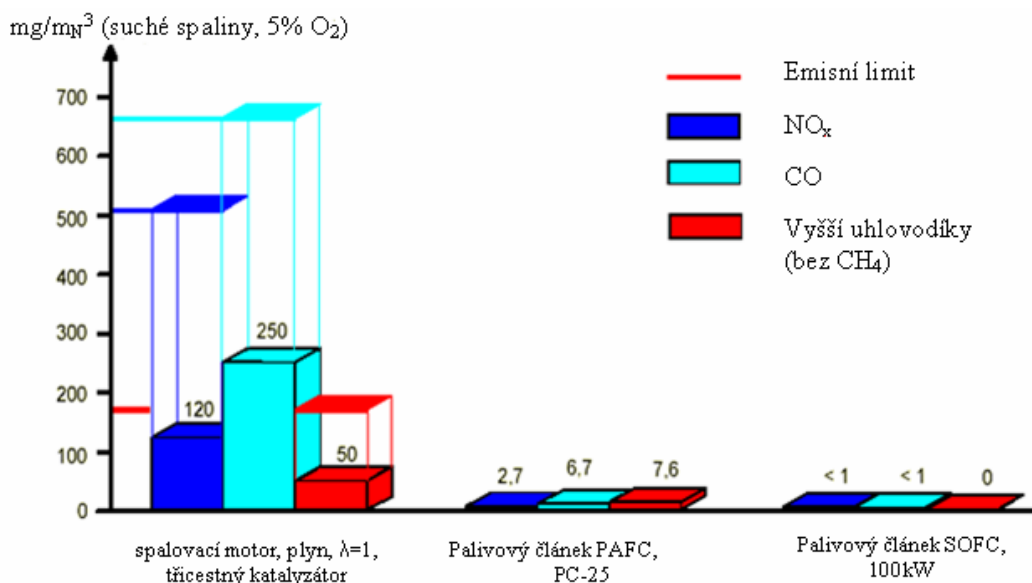
Mezi zdroje energií, označované v dnešní době jako alternativní a mající potenciál stát se náhradou za stávající energetické technologie spalující fosilní paliva, patří i diskutované palivové články a potažmo obecně vodíkové technologie. Dle prognóz by spolu s dalšími technologiemi měly v budoucnu pokrývat čím dál tím větší podíl z celosvětového balíku energií, viz obrázek 1-5.



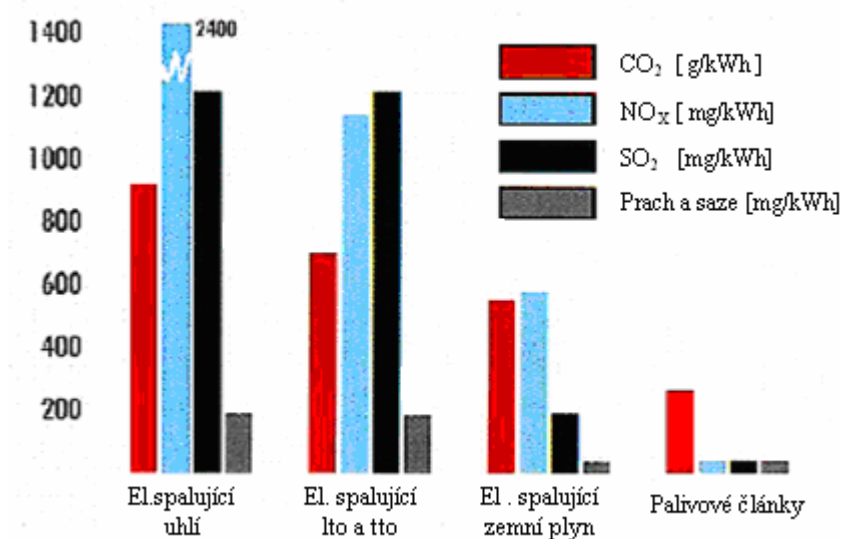
Obrázek 1-5 Prognóza nárůstu spotřeby energie a předpokládaného složení zdrojů (Institute for Energy Technology and Power Plant, TU Munich).

V dalších kapitolách bude popsán vlastní princip palivových článků, ve stručnosti však je možno znova konstatovat, že vlastní účinnost přeměny energie v palivových člancích je efektivnější než u stávajících energetických zdrojů spalujících fosilní paliva.

Srovnáme-li oba principy, představované přímým spalováním a následnou přeměnou energie a přímou přeměnou energie chemických vazeb na elektrickou energii v palivových člancích, při využití zemního plynu jako paliva, potom je úroveň emisí škodlivých plynů z technologie palivových článků mnohem nižší a tudíž ekologicky šetrnější.



Obrázek 1-6 Srovnání emisí palivových článků systému PAFC a SOFC s emisemi spalovacího motoru (Blum L., Peters R.).



Obrázek 1-7 Orientační srovnání měrných emisí palivových článků s emisemi elektráren. bloků spalujících fosilní paliva (paliv. články pracující se zemním plynem) (Steinberger-Wilekens R.).

Budeme-li uvažovat použití vodíku, jakožto paliva pro palivové články, můžeme hovořit o technologii bezemisní. Je nutno však brát v úvahu zdroj vodíku, resp. způsob jeho výroby. V současné době je vodík v průmyslu získáván v naprosté většině technologií parního reformingu nižších uhlovodíků, především zemního plynu (resp. metanu). Technologie palivových článků typu SOFC a MCFC jsou uzpůsobeny k přímému zpracovávání uhlovodíků.

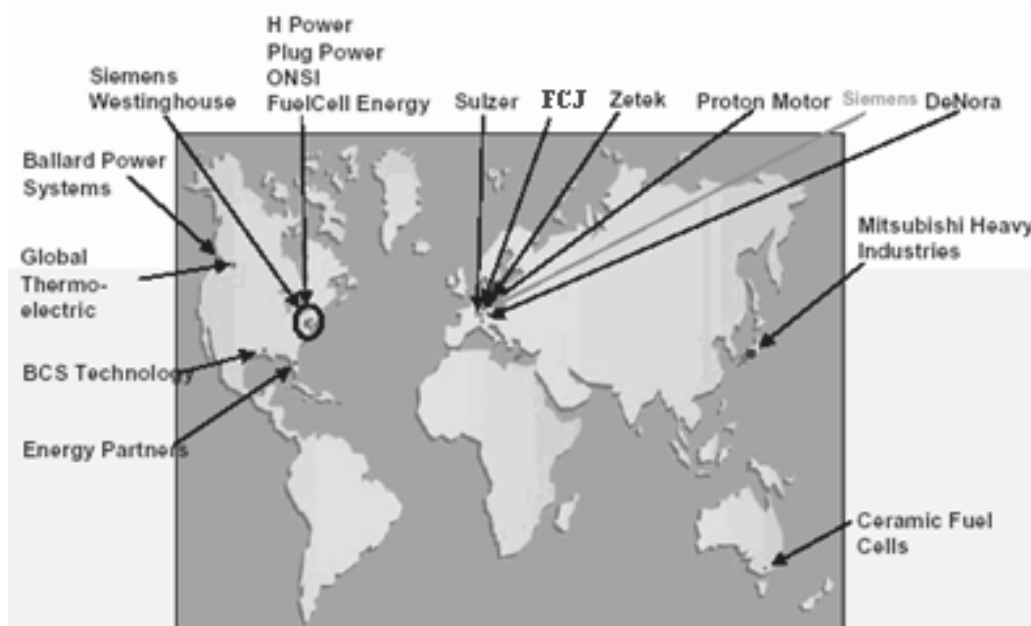
V případě využití fosilního paliva jako zdroje vodíku můžeme napsat, že se jedná o technologii *místně bezemisní* (ve vztahu k CO₂ a dalším emisím).

V případě získávání vodíku pomocí obnovitelných zdrojů můžeme hovořit o komplexním celku přípravy vodíku jako o technologii zcela bezemisní. Přínos této technologie pro řešení zmiňovaných problémů je jasný.

Možné obnovitelné zdroje energií (OZE) předpokládané pro výrobu vodíku jsou:

- větrná energie (výroba elektrické energie za účelem elektrolýzy vody),
- energie z biomasy (zplyňování, reformování bioplynu, metanu),
- vodní energie,
- dalšími OZE, které v budoucnu mohou hrát podstatnější roli, jsou:
- fotovoltaika,
- termolýza s pomocí solární energie,
- bakterie, řasy.

V případě získávání vodíku z fosilních uhlovodíků, je přínos této technologie, co se týče emisí, taktéž zřejmý, viz. obrázek 1-7. Významnou roli potom hraje účinnost přeměn energií a tím i specifické emise CO_2 . Pod úhlem spotřeby fosilních paliv je účinnost přeměn energií zásadním faktorem. Samozřejmě, že důsledkem vyšší účinnosti přeměny energie při zachování energetického požadavku je snížení spotřeby fosilních paliv a tím i snížení emisí skleníkových plynů.



Obrázek 1-8 Střediska výzkumu, vývoje a výroby palivových článků.

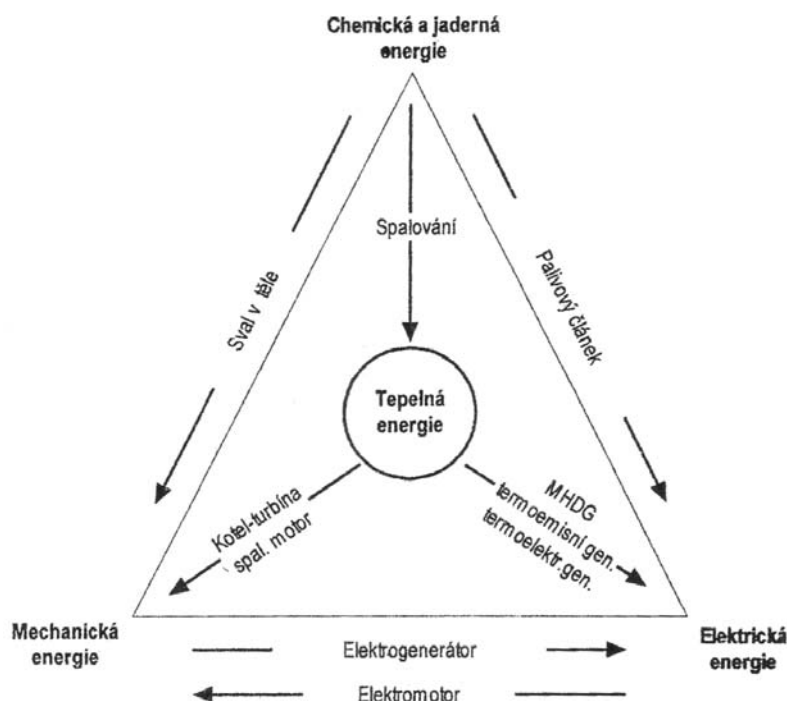
Pro další generace bude cílem výzkumu v oblasti získávání energií jaderná fúze, jakožto předpokládaný primární zdroj energie. Další generace již snad budou schopny tento proces výroby elektrické a tepelné energie technologicky ovládnout.

2 RINCIP PRÁCE PALIVOVÉHO ČLÁNKU, OBECNÉ TEORETICKÉ ZÁKLADY

Jak již bylo zmíněno v předcházející kapitole, fosilní paliva jsou v dnešní době základním zdrojem energie potřebné pro společnost. Využívá se energie uložené v chemických vazbách těchto paliv, jež je prostřednictvím chemické reakce (hoření, spalování) transformována na energii tepelnou, používanou například pro vytápění, především však pro pohon velkých turbosoustrojí a tedy pro energii elektrickou.

Při výrobě elektrické energie klasickým způsobem, tedy spalováním fosilních paliv v tepelných elektrárnách, je palivo oxidováno a dochází k uvolňování jeho chemické energie ve formě energie tepelné. Tato energie je následně odebírána vzniklým produktům oxidace, spalinám, pracovní látkou Rankin-Clausiova - parního cyklu. Dále je v tomto cyklu energie pracovní látky transformována prostřednictvím parní turbíny na mechanickou energii a následně v alternátoru přeměněna na energii elektrickou.

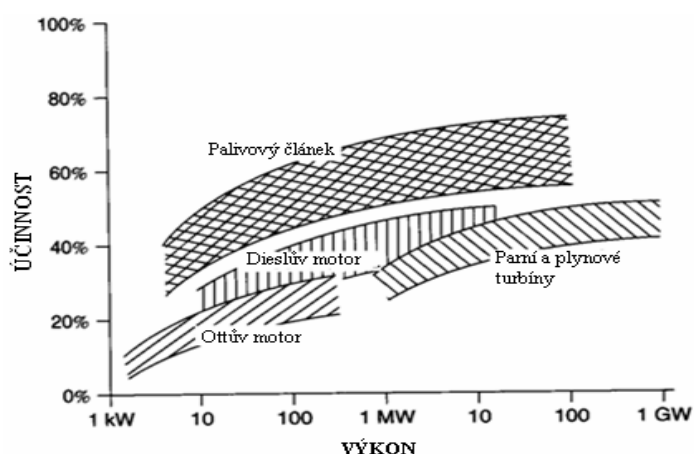
Dalším možným způsobem transformace energie chemické na elektrickou je využití tepelných strojů, jako jsou spalovací motory, spalovací turbíny atd., s transformací uvolněné tepelné energie na mechanickou energii a následně energii elektrickou v alternátoru. U všech těchto zmíněných způsobů transformace energie chemické na elektrickou je nutno projít cyklem mezistupňů přeměn energie, a to z chemické spalováním na tepelnou, z tepelné na mechanickou a z mechanické na elektrickou viz obrázek 2-1.



Obrázek 2-1 Schématické znázornění přeměn energií.

Je zřejmé, že jednotlivé transformace energií v reálném oběhu jsou zatíženy vlastními ztrátami a omezeními.

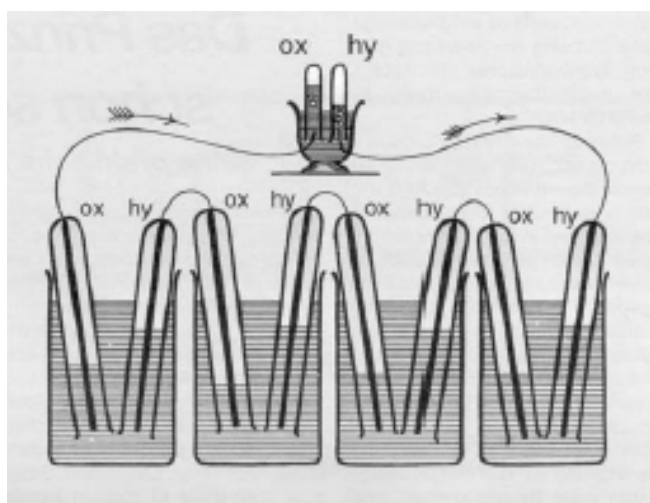
Maximální teoretická účinnost tepelného cyklu je dána účinností Carnotova oběhu. Účinnost daného tepelného oběhu, a to buď Rankin-Clausiova nebo cyklu spalovacích motorů, popř. turbín, je pak menší než teoretická účinnost porovnávacího oběhu dané technologie. Takže maximálně dosažitelná účinnost daného tepelného cyklu je mnohem menší než teoretická hodnota. Naproti tomu v palivových článcích je chemická energie paliva transformována přímo na energii elektrickou, viz obrázek 2-1. Srovnání účinnosti palivového článku a klasických technologií je znázorněno na obrázku 2-2.



Obrázek 2-2 Porovnání teoretické účinnosti jednotlivých energetických systémů.

Historie palivového článku

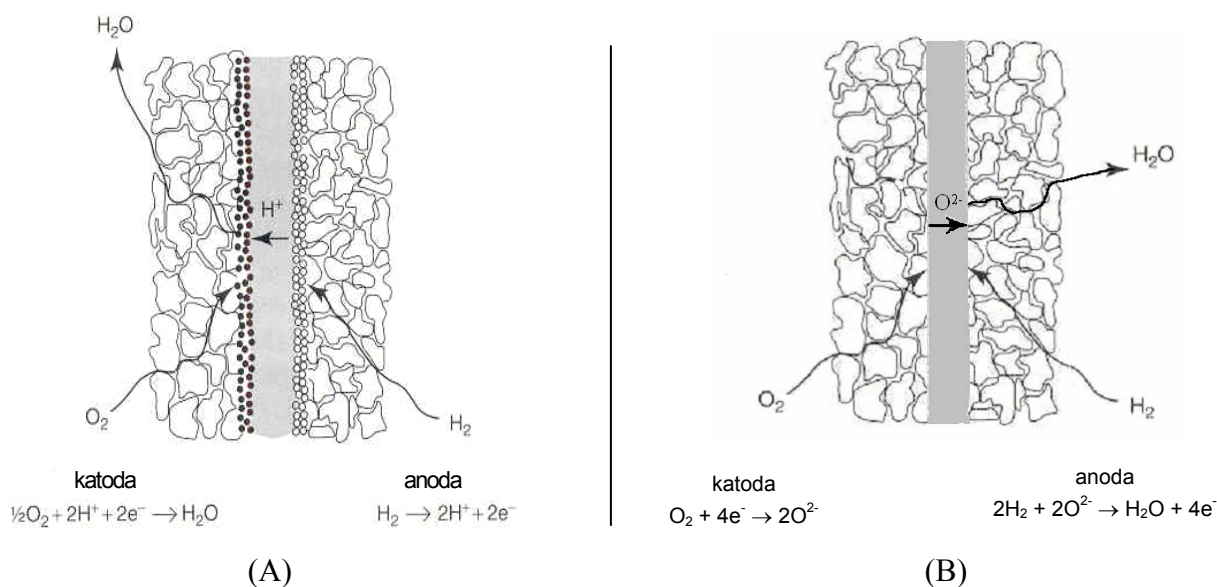
Vlastní princip práce palivového článku je známý již velice dlouhou dobu. Za objevitele palivových článků, přesněji principu jejich činnosti, je pokládán Sir William Grove. Jeho objev je datován rokem 1839. Dobový náčrt jeho pokusu je znázorněn na obrázku 2-3. Díky materiálové náročnosti této technologie však jeho objev nenašel ve své době širší uplatnění.



Obrázek 2-3 Dobový náčrt Groveova pokusu.

Od roku 1930 je možno opět vysledovat oživení zájmu o tuto technologii. Avšak až vesmírný výzkum v šedesátých a sedmdesátých letech 20. století v NASA, přinesl průlom v této technologii. V dnešní době je vývoj a výzkum palivových článků v počáteční fázi poloprovozních i komerčních aplikací.

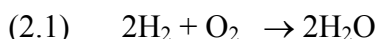
Vlastní palivové články se dělí dle níže popsaných kritérií, ideové uspořádání je však zachované. Obecně lze říci, že všechny typy palivových článků se skládají z anody, na kterou je přiváděno palivo, katody, na kterou je přiváděn oxidant, a elektrolytu. Katoda je oddělená od anody zmíněným elektrolytem, který umožňuje průchod iontů, avšak pro elektrony zůstává neprůchodný. Elektrolytem může být jak látka kapalná, tak i pevná, viz. obrázek 2-4. Elektrony jsou vedeny vnějším elektrickým obvodem a konají práci.



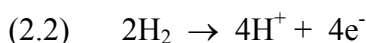
Obrázek 2-4 Principiální schéma funkce palivového článku, (A) vodíkového paliv. článku, (B) SOFC

Další popis funkce palivového článku je rozebrán na příkladu vodíkového palivového článku typu PEM (Proton Exchange Membrane). Popis jiných typů palivových článků je uveden v kapitole č. 5 “Typy palivových článků, základní rozdělení a popis základních funkčních principů, provozní teploty”.

Obecná rovnice reakce palivového článku je definována:



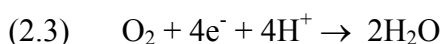
na anodě probíhá reakce:



elektrolytem procházejí ionty (protony vodíku) $4H^+$,

vnějším elektrickým obvodem procházejí elektrony $4e^-$,

reakce na katodě probíhá následovně:



Jak již bylo řečeno, palivový článek se skládá z anody, katody a elektrolytu s výše popsanými funkcemi. Neodmyslitelnou součástí palivového článku je však i látka, jež umožňuje „štěpení“ plynů, např. $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H} + 4\text{e}^-$, a vlastní reakce na elektrodách. Máme na mysli katalyzátor. Katalyzátor je pak u většiny článků látka nanesená na rozhraní elektrody a elektrolytu, resp. na elektrodě, nebo je již samotný materiál elektrody katalyzátorem pro danou chemickou reakci. U palivových článků typu PEM je katalyzátorem obvykle platina, pro články SOFC je katalyzátorem nikl.

3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PALIVOVÉHO ČLÁNKU

3.1 Elektrické napětí palivového článku

Jedním ze základních parametrů palivového článku je velikost dosažitelného napětí. Velikost dosažitelného napětí je dána vlastní chemickou reakcí.

Pro výpočet maximálního dosažitelného napětí na palivovém článku nás tedy zajímá velikost maximální možné uvolněné chemické energie W_{max} při dané reakci.

Maximální uvolněná chemická energie W_{max} je z definice rovna **reakční entalpii** ΔH_f [kJ/mol]. Index f symbolizuje, že entalpie je vztažena k příslušné formaci. V elektrochemii je pak maximální možná získaná energie rovna Gibbsově volné energii (formace), označované v elektrochemii G_f [kJ/mol], viz. následující odstavec, kde je definice tohoto termodynamického potenciálu.

V případě palivových článků je to právě **Gibbsova volná energie** G_f , která udává množství energie, které je přeměnitelné na externí, užitečnou elektrickou práci. Velikost změny Gibbsovy volné energie potom můžeme definovat následujícím vztahem:

$$(3.1) \quad \Delta G_f = \Delta H_f - T \cdot \Delta S,$$

kde T je termodynamická (absolutní) teplota [K],
 ΔS představuje změnu entropie [kJ · mol⁻¹ · K⁻¹].

Změnu Gibbsovy volné energie můžeme vyjádřit:

$$(3.2) \quad \Delta G_f = G_{f(\text{produktů})} - G_{f(\text{reaktantů})},$$

kde $G_{f(\text{produktů})}$ představuje Gibbsovu volnou energii produktů reakce [kJ · mol⁻¹],
 $G_{f(\text{reaktantů})}$ představuje Gibbsovu volnou energii reaktantů [kJ · mol⁻¹].

Vnější (externí) práci, kterou konají elektrony, můžeme vyjádřit jako součin velikosti náboje přenášeného elektrony a rozdílu potenciálu, který musí překonat. Vnější práci tedy můžeme definovat vztahem:

$$(3.3) \quad W_{max} = n \cdot F \cdot U_{th}$$

kde U_{th} je elektromotorická síla (elektromotorické napětí) v otevřeném elektrickém obvodu s palivovým článkem, kterým neprochází proud. Je to vlastně maximální teoreticky dosažitelné elektrické napětí v palivovém článku,

F Faradayova konstanta = $e \cdot N_a$,

kde e elementární elektrický náboj (1,602 · 10⁻¹⁹ C),

N_a Avogadrova konstanta (6,023 · 10²⁶ kJ/mol).

n počet elektronů na jednu reagující molekulu paliva [-].

Za předpokladu, že $dW_{max} = -dH_f$, můžeme psát vztah pro velikost maximálního teoretického, tzv. entalpického, svorkového napětí článku:

$$(3.4) \quad U_{th} = -\frac{\Delta H_f}{n \cdot F},$$

resp. pro reálný děj lze psát, za předpokladu $dW_{max} = -dG_f$, vztah pro velikost maxim. teoreticky dosažitelného svorkového napětí:

$$(3.5) \quad U_{th} = -\frac{\Delta G_f}{n \cdot F}$$

Tyto vztahy se zdají být dostatečně přímé a jednoduché. Nicméně, Gibbsova volná energie není konstantní. Mění se s teplotou a stavem látek účastnících se reakce. Tabulka 2-1, uvedená níže, znázorňuje ΔG_f pro základní reakci vodíkového palivového článku ($H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$), pro různé výstupní teploty produktové vody.

Tabulka 2-1 ΔG_f pro reakci $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$ při různých teplotách.

Forma produktové vody	Teplota	ΔG_f	Maximální elektromotorické napětí
	(°C)	(kJ mol ⁻¹)	V
Kapalná	25	-237,2	1,23
Kapalná	80	-228,2	1,18
Plynná	80	-226,1	1,17
Plynná	100	-225,2	1,17
Plynná	200	-220,4	1,14
Plynná	400	-210,3	1,09
Plynná	600	-199,6	1,04
Plynná	800	-188,6	0,98
Plynná	1000	-177,4	0,92

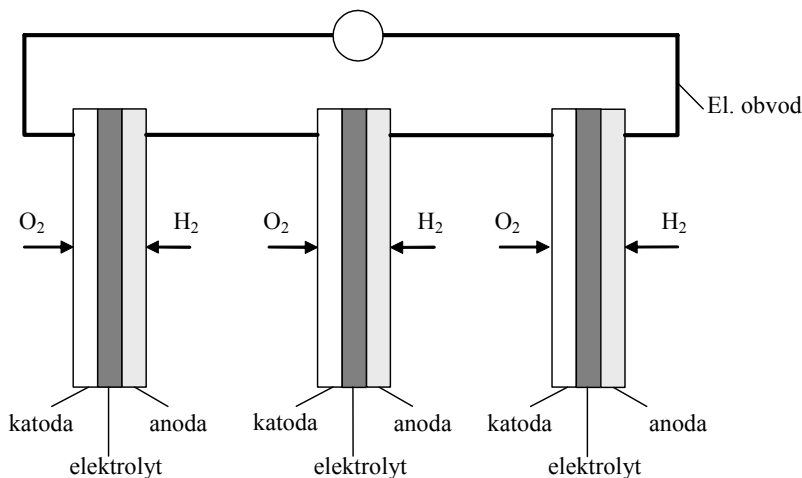
Známe-li velikost entalpie a změny Gibbsovy volné energie chemické reakce ($\Delta H_f = 285,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\Delta G_f = -237,2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), potom jejich dosazením do vztahů (3.4) a (3.5) získáme teoretické svorkové elektrické napětí pro vodíkový palivový článek:

$$(3.6) \quad U_{th} = -\frac{\Delta H_f}{n \cdot F} = \frac{-285,8 \left[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \right]}{2 \left[- \right] \cdot 96\,487 \left[\text{C} \cdot \text{mol}^{-1} \right]} = 1,48 \left[\text{V} \right],$$

$$(3.7) \quad U_{th} = -\frac{\Delta G_f}{n \cdot F} = \frac{-237,2 \left[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \right]}{2 \left[- \right] \cdot 96\,487 \left[\text{C} \cdot \text{mol}^{-1} \right]} = 1,23 \left[\text{V} \right].$$

Maximální teoreticky dosažitelné svorkové napětí elementárního vodíkového palivového článku je tedy 1,23 V.

Je jasné, že velikost tohoto napětí je pro další využití resp. transformaci na střídavé napětí poměrně problematická, proto jsou jednotlivé články vždy řazeny do sérií, tzv. stacků, viz. obrázek 3-1.



Obrázek 3-1 Schéma řazení elementárních palivových článků do stacku.

Výše uvedený výpočet svorkového elektrického napětí stanovuje dosažitelné napětí za normálních termodynamických podmínek.

Elektrické napětí na článku je však závislé na stavových veličinách plynů, na koncentraci reakčních plynů, tj. jejich parciálních tlacích, a na využití jednotlivých plynů. Závislost elektrického napětí na článku na parciálním tlaku je popisována Nernstovou rovnicí, která je pro vodíkový palivový článek definována následovně:

$$(3.8) \quad E = E^0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right),$$

- kde E je svorkové napětí palivového článku [V],
 E^0 je elektromotorické napětí palivového článku při standardním tlaku [V],
 R představuje molární plynovou konstantu, $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
 T je termodynamická (absolutní) teplota reakce [K],
 P_i jsou příslušné poměrné parciální tlaky [-].

Potom konečný nárůst napětí na svorkách palivového článku ΔU při zvýšení tlaku reakčních plynů lze po úpravě výrazu vyjádřit ve tvaru

$$(3.9) \quad \Delta U = \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln(P_2) - \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln(P_1) = \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right).$$

Vyšší provozní tlak vede tedy k vyššímu pracovnímu napětí, při stejné proudové hustotě. Obecně se výstupní elektrické napětí palivových článků mění podle proudové zátěže, zmíněného složení palivových plynů (parciálních tlaků) a stavových podmínek. Podrobnější popis vlivu

uvedených parametrů na výstupní elektrické napětí palivového článku je uveden v Larminie, Dicks (2003).

Pro dosažení konstantní velikosti stejnosměrného napětí je nutno primární napětí regulovat pomocí DC/DC regulátorů. K připojení na střídavé napětí je nutné použití střídačů (invertorů). O přeměně parametrů elektrické energie vystupující z palivového článku pojednává podrobněji kapitola 4, “*Transformace a doprava elektrické energie*”.

3.2 Účinnost přeměny energie

3.2.1 Účinnost tepelného oběhu

Maximální teoretická účinnost tepelného oběhu, se kterým budeme palivové články srovnávat, je účinnost Carnotova oběhu η_{Car} . Vyjadřuje ji obecně známá závislost:

$$(3.10) \quad \eta_{Car} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

kde T_1 je nejvyšší termodynamická teplota tepelného oběhu [K],

T_2 představuje nejnižší termodynamickou teplotu tepelného oběhu [K].

Vlastní účinnost Carnotova oběhu je tedy závislá pouze na nejvyšší a nejnižší teplotě, mezi kterými oběh pracuje.

3.2.2 Účinnost a účinnostní limity palivového článku

Teoretická termodynamická účinnost η_{th}

Teoretická termodynamická účinnost palivových článků η_{th} se udává jako poměr

$$(3.11) \quad \eta_{th} = \frac{\Delta G_f}{\Delta H_f},$$

kde ΔH_f ... je entalpie pro oxidační reakce paliv [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$],

ΔG_f ... je změna Gibbsovy volné energie [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$].

Gibbsova volná energie – termodynamický potenciál

Předpokládejme systém v teplotní rovnováze s okolím při teplotě T , z definice entropie tedy plyne:

$$(3.12) \quad dS - \frac{dQ}{T} \geq 0, \quad T = \text{konst.}$$

($>$ nebo = znamená, že se jedná o děje nevratné a vratné)

a) Jestliže se jedná o izochorický děj ($V = \text{konst.}$), potom $dQ = dU$ a můžeme psát

$$(3.13) \quad dS - \frac{dU}{T} \geq 0 ,$$

resp. $T \cdot dS \geq dU$. Po úpravě, $dU - T \cdot dS \leq 0$.

b) Jestliže se jedná o izobarický děj ($p = \text{konst.}$), pak $dQ = dH$ a

$$(3.14) \quad dS - \frac{dH}{T} \geq 0 ,$$

resp. $T \cdot dS \geq dH$. Po úpravě, $dH - T \cdot dS \leq 0$

Tedy termodynamickou stavovou funkcí je Gibbsova volná energie, která je definována

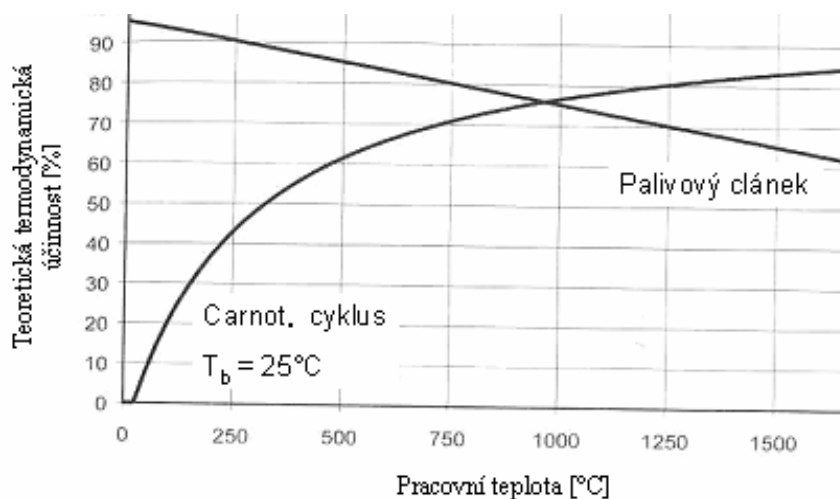
$$(3.15) \quad G = H - T \cdot S \quad (T \text{ a } p = \text{konst.})$$

Gibbsova energie je tedy volná entalpie, izotermně - izobarický potenciál. Člen $T \cdot dS$ je tzv. vázaná energie, tj. část energie, která nemůže být přeměněna na práci. Můžeme tedy psát:

$$(3.16) \quad dW_{\max} = dG,$$

kde $dW_{\max}$... je maximální užitečná práce u palivového článku pro izobaricko-izotermický systém [$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$].

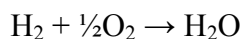
Na obrázku 3-2 je znázorněná termodynamická účinnost pro vodíkový palivový článek a účinnosti Carnotova cyklu v závislosti na pracovní teplotě (pro nejnižší teplotu Carnotova cyklu $T_b = T_2 = 25^\circ\text{C}$.)



Obrázek 3-2 Porovnání teoretické účinnosti palivového článku s Carnotovým cyklem.

Proč je teoretická účinnost palivového článku závislá na teplotě, je zřejmé z analýzy vztahů (3.1) a (3.11) a dat v tabulkách 3-2 a 3-3, kde jsou uvedeny hodnoty reakční entalpie, entropie a Gibbsovy energie pro různé teploty.

Tabulka 3-2 Hodnoty reakční entalpie, entropie a Gibbsovy volné energie pro reakci



Teplota [°C]	ΔH_f [kJ·mol ⁻¹]	ΔS [kJ·mol ⁻¹]	ΔG_f [kJ·mol ⁻¹]
100	-242,6	-0,0470	-225,2
300	-244,5	-0,0507	-215,4
500	-246,2	-0,0533	-205,0
700	-247,6	-0,0549	-194,2
900	-248,8	-0,0561	-183,1

Tabulka 3-3 Hodnoty maximální teoretické účinnosti přeměny energie paliv, vyjádřené jako spalovací nebo reakční entalpie ΔH_f , na užitečnou práci vyjádřenou prostřednictvím ΔG_f při teplotách 300 a 1000 K

Palivo → produkt	T = 300 K			T = 1000 K		
	ΔH_f [kJ · mol ⁻¹]	ΔG_f [kJ · mol ⁻¹]	η [%]	ΔH_f [kJ·mol ⁻¹]	ΔG_f [kJ·mol ⁻¹]	η [%]
H ₂ → H ₂ O(g)	-241,844	-228,538	94,5	-247,858	-192,713	77,8
CO → CO ₂	-282,976	-257,025	90,8	-282,605	-195,549	69,1
CH ₄ (g) → H ₂ O(g) + CO ₂	-802,264	-800,839	99,8	-800,466	-800,812	100
CH ₃ OH(g) → H ₂ O(g) + CO ₂	-675,958	-689,238	102,0	-673,090	-725,058	107,7
C ₂ H ₅ OH(g) → H ₂ O(g) + CO ₂	-1277,6	-1306,6	102,3	-1277,9	-1378,3	107,9

Pozn.: Mírná odlišnost hodnot ΔH_f a ΔG_f pro teplotu 300°C je dána odlišností hodnot uváděných v různých podkladech pro tuto studii.

Pro některé oxidační reakce dosahují teoretické účinnosti hodnot nad 100% (např. oxidace metanolu či alkoholů)

Je-li $\eta_{th} > 1$, jedná se teoreticky nejen o přeměnu energie paliva, ale také části tepla z okolí na práci.

Skutečná účinnost palivového článku η_{re}

Skutečná účinnost palivových článků η_{re} [%] se udává jako poměr užitečného elektrického výkonu P_{el} [W] palivového článku, k celkové energii vstupující do palivového článku v palivu $n_{in} \cdot \Delta H_f$ [kJ] za jednotku času [s], přičemž velikost užitečného elektrického výkonu palivového článku P_{el} vypočítáme následovně:

$$(3.17) \quad P_{el} = U_{re} \cdot I_{re},$$

kde U_{re} je skutečné stejnosměrné el. napětí na svorkách palivového článku [U],

I_{re} představuje skutečný proud tekoucí z palivového článku při daném zatížení [A].

Potom skutečnou účinnost palivového článku určíme dle následujícího vztahu:

$$(3.18) \quad \eta_{re} = \frac{-U_{re} \cdot I_{re}}{\Delta H_f \cdot n_{in}},$$

kde n_{in} je látkové množství částic vstupujících do palivového článku (vstupní molární tok paliva) za jednotku času [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$].

nebo přesněji, jako poměr užitečného výkonu palivového článku a energetického výkonu skutečně spotřebovaného paliva

$$(3.19) \quad \eta_{re} = \frac{-U_{re} \cdot I_{re}}{\Delta H_f \cdot (n_{in} - n_{out})},$$

kde n_{out} je látkové množství částic vystupujících z palivového článku (výstupní molární tok nezreagovaného paliva) za jednotku času [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$].

Tok n_{out} se týká především palivových článků vysokoteplotních, kde nízké koncentrace palivového plynu v inertním plynu jsou již obtížně zužitkovatelné a jsou dále spalovány v následně zařazené **dospalovací komoře**.

Často bývá též definován **stupeň využití paliva** μ_f [%], který můžeme vyjádřit:

$$(3.20) \quad \mu_f = \frac{\text{množství paliva reagujícího v palivovém článku}}{\text{množství paliva vstupujícího do palivového článku}} = \frac{n_{in} - n_{out}}{n_{in}}.$$

Dobrý odhad pro μ_f je 0,95, který umožňuje účinnosti palivového článku, aby byla stanovena z jednoduchého měření jeho napětí.

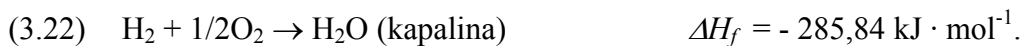
Účinnostní limity palivového článku

Poněvadž palivový článek využívá materiály, jež obvykle musí hořet, aby uvolnili svou energii, potom se jako vhodné jeví využít srovnání vyrobené elektrické energie s teplem, které vzniká spalováním těchto materiálů. Tato hodnota se obvykle nazývá **výhřevnost paliva**. Chceme-li však využít přesnější vyjádření, potom se jedná o změnu entalpie, jež byla popsána výše. Abychom tedy obdrželi vhodné srovnání s ostatními technologiemi je účinnost palivového článku obvykle definována dle uvedeného vztahu 3.18.

Nicméně, ani tento vztah se neobejde bez jakéhosi dvojsmyslu, jež je skryt v hodnotě ΔH_f . Pro spalování vodíku s výsledkem produktové vody v podobě páry je hodnota změny entalpie:



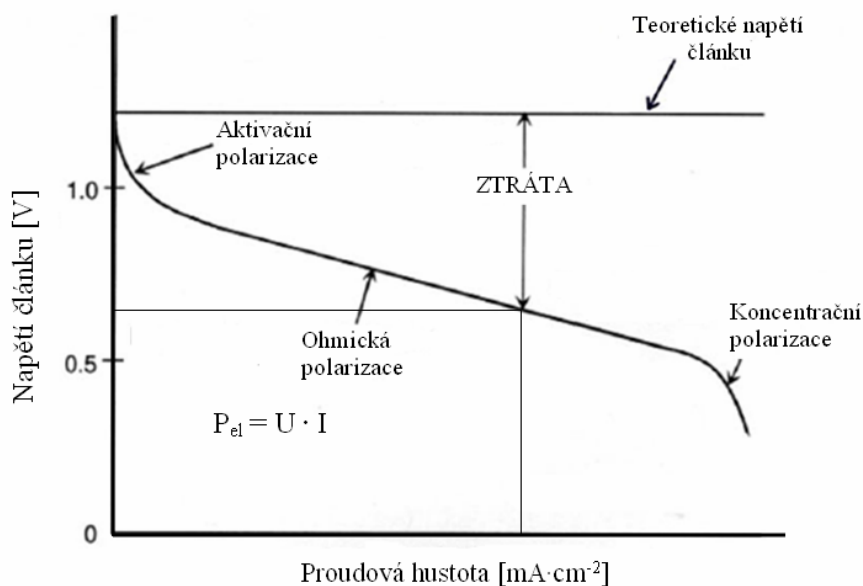
V případě, že produktová voda zkondenzuje zpět na kapalinu, potom:



Rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami ΔH_f ($44,01 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) je molární entalpie pro odpařování vody (tato hodnota je známa pod označením **molární latentní teplo**). Vyšší hodnota změny entalpie představuje horní mez výhřevnosti paliva (HHV), a nižší hodnota, je potom logicky spodní mezí výhřevnosti paliva (LHV). Jakékoliv vyjádření účinnosti by mělo říci, jestli souvisí s horní či dolní mezí výhřevnosti paliva. Jestliže takto není řečeno, potom byla pravděpodobně použita spodní hodnota výhřevnosti paliva (LHV), neboť vede k vyšší hodnotě účinnosti.

3.3 U-I (polarizační) charakteristika palivového článku, Výkon palivového článku

Palivový článek, jakožto elektrochemický generátor vykazuje odpovídající vlastnosti, vycházející z chemicko fyzikálních pochodů, jež s sebou samozřejmě nesou určitá omezení a vnitřní ztráty. Výsledkem těchto jevů je charakteristická U-I závislost palivového článku, která je znázorněna na obrázku 3-3.

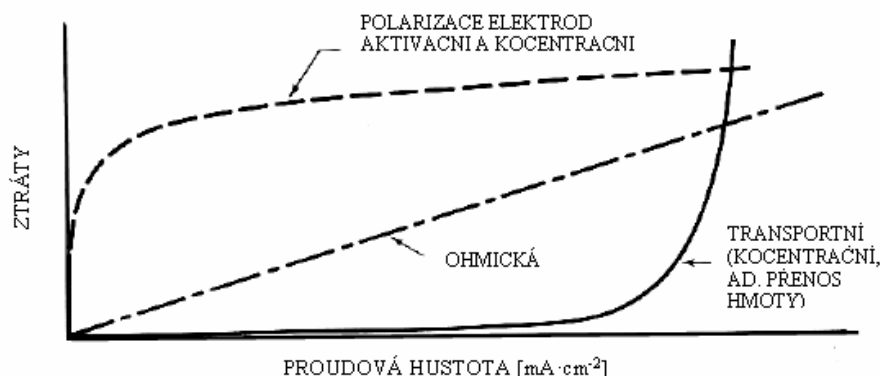


Obrázek 3-3 U-I (polarizační) charakteristika palivového článku.

Příčiny daného chování palivových článků, tvaru U-I charakteristiky, lze hledat v:

- **Aktivační polarizaci elektrod** (posunutí elektrodového potenciálu při průchodu proudem)
 - změna koncentrace u povrchu elektrody = změna elektrodového potenciálu,
 - průchodem proudem je narušena rovnováha mezi chemickými a elektrickými silami působícími na volné náboje v povrchové vrstvě.

- **Ohmických ztrátách** (úbytek elektrického napětí narůstá lineárně s elektrickým proudem procházejícím článkem dle Ohmova zákona).
- **Koncentrační polarizaci** (ztráty způsobené dosažením kritické hodnoty přenosu hmoty. Po překročení určité hranice rychlosti vlastní reakce dochází ke zhroucení mechanismů přenosu hmoty a následnému strmému úbytku napětí na článku).



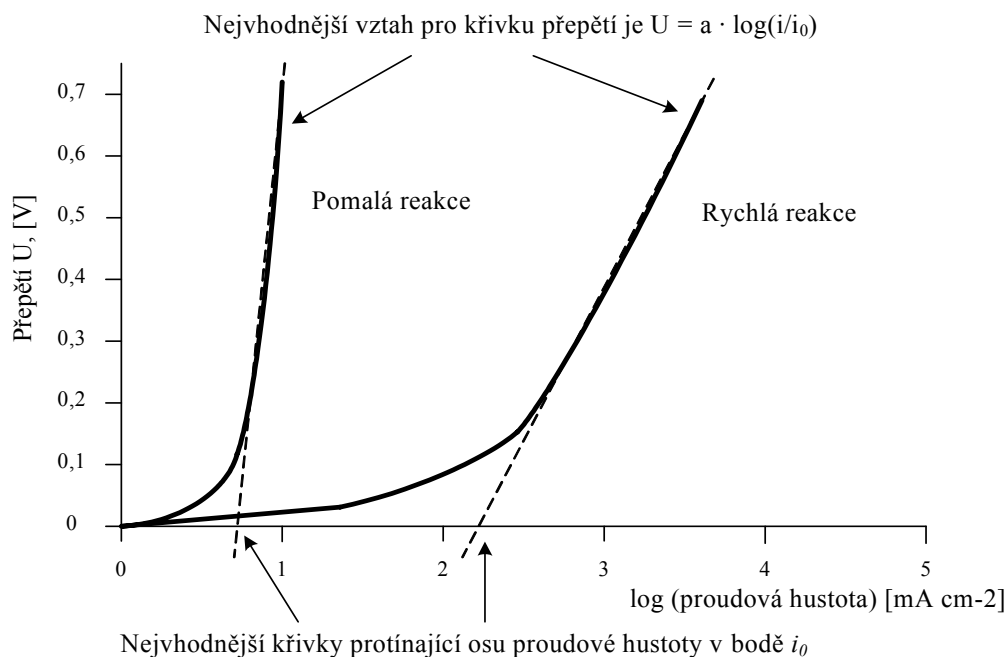
Obrázek 3-4 Relativní nárůst jednotlivých typů polarizací (úbytků elektrického napětí) palivového článku.

Kromě výše zmíněných příčin hraje nezanedbatelnou roli také **průchod paliva elektrolytem a vnitřní proud** – tato energetická ztráta vychází z nevyužití veškerého paliva, jež “uniká” reakci průchodem elektrolytu, a v menším rozsahu také prostřednictvím elektronové vodivosti elektrolytu. Elektrolyt by měl dopravovat pouze ionty. Nicméně, určité množství difundovaného paliva a elektronového toku prochází palivovým článkem. Vyjma palivových článků s přímým využitím metanolu (DMFC), ztráty paliva a proudu jsou malé a jejich vliv tedy není obvykle příliš důležitý. Avšak tento jev má významný vliv na napětí naprázdno nízkoteplotních palivových článků, jež bude popsán v kapitole 3.3.2.

3.3.1 Aktivační ztráty

Tafelova rovnice

Pomocí řady experimentů chemik, švýcarského původu, Julius Tafel objevil a v roce 1905 zveřejnil poznatek, že přepětí na povrchu elektrody následuje příslušný vzorec pro jednotlivé typy elektrochemických reakcí. Na obrázku 3-5 je průběh tohoto přepětí znázorněn pro dvě různé rychlosti průběhu elektrochemické reakce. Je zde ukázáno, že průběh přepětí vůči logaritmu proudové hustoty můžeme aproximovat přímkou. Tyto průběhy vyjadřující závislost přepětí na logaritmu proudové hustoty jsou známy pod pojmem **Tafelovy křivky**. Diagram ukazuje dvě typické křivky.



Obrázek 3-5 Tafelovy křivky pro pomalé a rychlé elektrochemické reakce.

Definujeme Tafelovu rovnici, která vyjadřuje vztah přepětí na elektrodě s proudovou hustotou palivového článku. Jednou z možností jejího vyjádření je prostřednictvím přirozeného logaritmu, neboť tento vztah je následně lehce slučitelný se vztahy (3.8) a (3.9). Potom pro hodnotu přepětí ΔU_{act} [V] můžeme psát:

$$(3.23) \quad \Delta U_{act} = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right),$$

kde A je konstanta Tafelovy rovnice [V],

i představuje hustotu proudu palivovým článkem [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$],

i_0 je konstanta nazývaná výměnná proudová hustota [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$].

Konstanta A je vyšší pro elektrochemické reakce, které probíhají pomalu. Konstanta i_0 je tím vyšší čím je reakce rychlejší. Je nutné mít na paměti, že Tafelova rovnice platí pouze v případě, kdy $i > i_0$.

Při nulové proudové hustotě můžeme předpokládat, že na elektrodě není žádná aktivita a tedy tato reakce se neodehrává. Ve skutečnosti tomu tak není; reakce se odehrává po celý čas, avšak současně probíhá se stejnou rychlostí reakce opačná.

V elektrolytu se tedy vyskytuje plynulý tok elektronů jedním i druhým směrem (od anody ke katodě a naopak). Je zcela jasné, že jestliže je proudová hustota i_0 vysoká, potom povrch elektrod je více aktivní a proud v jednom specifickém směru je více pravděpodobný.

Měli bychom poznamenat, že prostřednictvím matematických operací můžeme Tafelovu rovnici převést na tvar vyjadřující nám proud oproti dřívějšímu vztahu pro napětí. Je tedy možné ukázat, že ze vztahu pro změnu napětí ΔU_{act} můžeme získat vztah pro výměnnou proudovou hustotu:

$$(3.24) \quad i = i_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta U_{skut}}{A}\right).$$

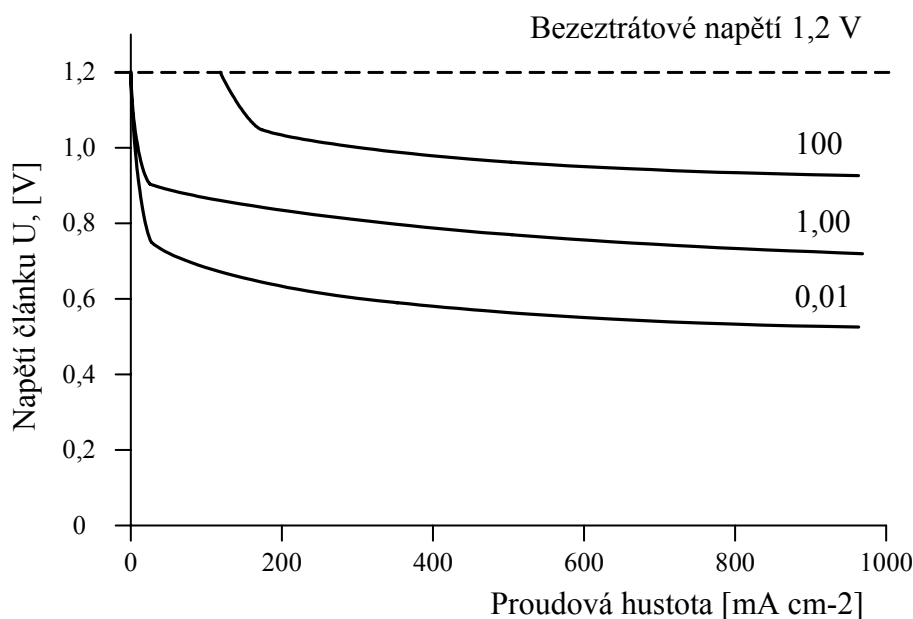
Tento vztah se nazývá Butler-Vollmerův vztah a je velmi často využíván jako ekvivalent k Tafelově rovnici.

Představme si, že palivový článek nemá vůbec žádné ztráty kromě těch, jež jsou potřebné pro aktivaci tohoto přepětí na jedné elektrodě. Potom napětí palivového článku bude dáno vztahem:

$$(3.25) \quad U = E - A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right),$$

kde E je vratné napětí palivového článku naprázdno [V].

Jestliže vykreslíme graf tohoto vztahu pro hodnoty $i_0 = 0,01$; $1,00$ a $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ a pro konstantu A použijeme hodnotu $0,06 \text{ V}$, potom získáme křivky uvedené v obrázku 3-6.



Obrázek 3-6 Graf závislosti napětí palivového článku na proudové hustotě, s předpokladem, že ztráty vznikají pouze v důsledku aktivačního přepětí na jedné elektrodě, pro hodnoty výměnné proudové hustoty $i_0 = 0,01$; $1,00$ a $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Význam i_0 je tedy zřejmý. Efektem u většiny hodnot proudové hustoty je snížení napětí palivového článku o pevnou hodnotu, jež můžeme předpovědět pomocí Tafelovy rovnice. Čím menší je hodnota i_0 , tím vyšší je pokles napětí palivového článku a naopak. Všimněme si, že při

i_0 rovném $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ nedochází k poklesu napětí až do okamžiku, než je proudová hustota i vyšší než $100 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Musíme poznamenat, že přepětí na kyslíkové elektrodě (katodě) je mnohem větší než přepětí na elektrodě vodíkové (anodě). Obecně spočítané přepětí na anodě je zanedbatelné ve srovnání s tím na katodě, a to přinejmenším v případě vodíkových palivových článků. Pro nízkoteplotní a vodíkový palivový článek, využívající jako okysličovadlo vzduch s tlakem okolí (0,1 MPa), bude typická hodnota pro i_0 rovna $0,1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ na katodě a okolo $200 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ na anodě.

Základním činitelem při vylepšování aktivačních ztrát a tím i chodu a výkonu palivového článku je tudíž hodnota i_0 , resp. její nárůst, a to obzvláště na katodě. To může být provedeno prostřednictvím následujících možností:

- nárůst teploty palivového článku,
- použití efektivnějšího katalyzátoru,
- zvýšení nerovnosti elektrod,
- zvýšení koncentrace reaktantů,
- nárůst tlaku reaktantů.

3.3.2 Průchod paliva elektrolytem paliva a vnitřní proud

Ačkoliv elektrolyt palivového článku je vybírán na základě průchodnosti příslušného typu iontu, vždy bohužel podporuje, ikdyž jen v malém množství, elektronovou vodivost.

U skutečných palivových článků také část paliva difunduje z anody na katodu. Pokud dojde na straně katody, za přítomnosti katodového katalyzátoru, k přímé reakci s kyslíkem, reakce proběhne, aniž by byla tato část paliva a energie z něj plynoucí využita v palivovém článku. Toto malé množství nevyužitého paliva procházejícího přes elektrolyt je známo pod pojmem *průchozí palivo*.

Tyto vlivy - průchod paliva elektrolytem a vnitřní proud – si jsou vzájemně rovny.

Ačkoliv vnitřní proud a průchod paliva elektrolytem jsou si rovny, přičemž průchod paliva elektrolytem je pravděpodobně důležitější, vlivu těchto dvou jevů na napětí palivového článku bude pro nás snazší porozumět, jestliže budeme uvažovat pouze vnitřní proud.

Vzhledem k existenci vnitřní proudové hustoty, není proudová hustota palivového článku rovna nule ani při rozpojeném obvodu. Jestliže tedy vnitřní proudová hustota palivového článku je $1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, potom napětí naprázdno bude 0,97 V, tedy o více než 0,2 V (20 %) nižší, než je hodnota teoretického napětí naprázdno. Velká odchylka od vratného napětí je způsobena velmi příkrým počátečním poklesem napětí, jež je patrný na obrázku 3-4. Strmost křivky vysvětluje též další pozorování nízkoteplotních palivových článků, jež hovoří o vysoce proměnném napětí naprázdno. Průběhy na obrázku 3-6 a tabulka 3-4 nám ukazují, že malé změny v průchodu paliva elektrolytem a/či vnitřního proudu, jež jsou způsobeny např.: změnou vlhkosti elektrolytu, mohou způsobit velké změny v napětí palivového článku.

Tabulka 3-4 Napětí palivového článku při malých proudových hustotách.

Proudová hustota (mA · cm ⁻²)	Napětí (V)	Proudová hustota (mA · cm ⁻²)	Napětí (V)
0	1,2	4,0	0,88
0,25	1,05	5,0	0,87
0,5	1,01	6,0	0,86
1,0	0,97	7,0	0,85
2,0	0,92	8,0	0,84
3,0	0,90	9,0	0,83

Průchod paliva elektrolytem a vnitřní proud nejsou zajisté lehce měřitelné – ampérmetr nemůže být včleněn do obvodu. Jednou možností je měřit spotřebu reagujících plynů při rozpojeném elektrickém obvodu. Pro jednoduché palivové články a malé stacky, nemůže být velmi nízká míra užití paliva měřena pomocí normálních plynových průtokoměrů, a standardně se toto měření provádí na základě počítání bublinek, pomocí plynové stříkačky či obdobnými technikami. Například malý palivový článek typu PEM s aktivní plochou membrány 10 cm² může mít při rozpojeném elektrickém obvodu spotřebu vodíku okolo 0,0034 cm³ · s⁻¹, při normálním tlaku a teplotě (měřeno na běžných komerčních článcích). Z Avogadrova zákona víme, že při standardní teplotě a tlaku (STP) je objem jednoho molu jakéhokoliv plynu 2,243 · 10⁴ cm³. Takže využití plynu je tedy 1,40 · 10⁻⁷ mol · s⁻¹.

Poněvadž množství využitého vodíkového paliva v jednoduchém palivovém článku ($n = 1$) je závislé na proudu I [A], můžeme s využitím matematických úprav sestavit vztah:

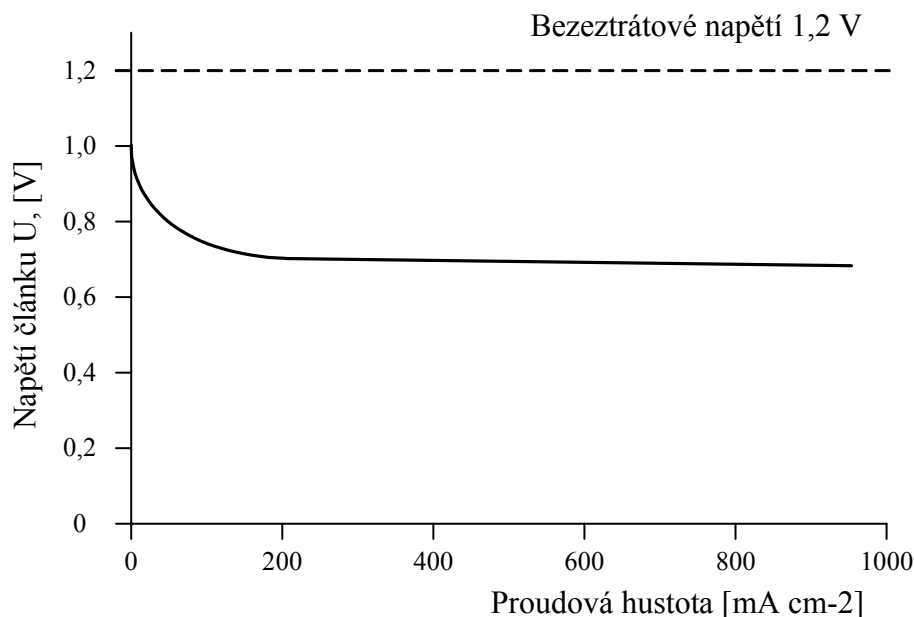
$$(3.26) \quad I = V_{\text{využití paliva}} \cdot 2 \cdot F.$$

V tomto případě odpovídají ztráty proudu I , jež má velikost $1,40 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 96\,500 = 27$ mA. Poněvadž aktivní plocha membrány palivového článku je 10 cm², odpovídá hodnota proudu proudové hustotě 2,7 mA · cm⁻². Tato proudová hustota nám dává celkovou proudovou hustotu i_n , jež je rovna součtu ztráty paliva způsobené průchodem paliva přes elektrolyt a skutečné vnitřní proudové hustoty.

Jestliže i_n [mA · cm⁻¹] je hodnota této celkové “ztrátové” proudové hustoty, potom vztah pro napětí palivového článku můžeme upravit do tvaru:

$$(3.27) \quad U = E - A \cdot \ln\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right).$$

Použitím hodnot typických pro nízkoteplotní palivové články, které jsou $E = 1,2$, $A = 0,06$ V, $i_0 = 0,04$ mA · cm⁻² a $i_n = 3$ mA · cm⁻², získáme graf závislosti napětí palivového článku na proudové hustotě, který je znázorněn na obrázku 3-7.



Obrázek 3-7 Graf znázorňující napětí palivového článku v závislosti na proudové hustotě, modelované s uvažováním, aktivačních ztrát, ztrát v důsledku průchodu paliva elektrolytem a průchodu vnitřního proudu.

Pozornému čtenáři zajisté neunikne, že tato křivka se začíná čím dál tím více podobat té, která je znázorněna na obrázku 3-3. Význam tohoto vnitřního proudu je v případě vysokoteplotních palivových článků mnohem menší, neboť výměnná proudová hustota i_0 je mnohem vyšší, díky čemuž není počáteční pokles napětí tolik znatelný.

3.3.3 Ohmické ztráty

Ztráty vzniklé v důsledku elektrického odporu elektrod a odporu vůči toku iontů v elektrolytu, jsou nejjednodušší na porozumění a modelování. Velikost poklesu napětí ΔU_{ohm} palivového článku je jednoduše úměrný elektrickému proudu I tekoucímu palivovým článkem, tedy:

$$(3.28) \quad \Delta U_{ohm} = I \cdot R_i,$$

kde R_i je vnitřní elektrický odpor palivového článku [Ω].

Ve většině palivových článků je odpor způsoben především elektrolytem, přičemž odpory propojení palivových článků a odpory bipolárních desek mohou být také důležité.

Abychom dodrželi soulad s předchozími vztahy pro ztráty napětí, musí být tento úbytek napětí vyjádřen na základě proudové hustoty. Abychom tak mohli učinit, musíme do výše uvedeného vztahu vnést veličinu odporu na 1 cm² aktivní plochy palivového článku, pro který využíváme symbol r . Tato veličina se nazývá *měrný (plošný) odpor* palivového článku. Vztah pro pokles napětí palivového článku v důsledku průchodu proudu článkem potom nabývá tvaru:

$$(3.29) \quad \Delta U_{ohm} = i \cdot r,$$

kde i je proudová hustota procházející palivovým článkem [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$],
 r je měrný (plošný) odpor palivového článku [$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$].

Tyto ohmické napěťové ztráty jsou důležité pro všechny typy palivových článků. Obzvláště důležité jsou v případě vysokoteplotních palivových článků na bázi pevných keramik (SOFC). Existují tři způsoby možnosti snížení vnitřních ohmických ztrát:

- využití elektrod s nejvyšší možnou vodivostí,
- vhodný tvar a využití vhodných materiálů bipolárních desek a jejich propojení,
- výroba elektrolytu tak tenkého, jak je to jen možné. Nicméně tento bod je velmi často obtížný, neboť elektrolyt musí být v některých případech tlustý např.: funguje-li jako nosný materiál elektrod či pokud je nutné zajistit dostatečný tok cirkulujícího elektrolytu. V každém případě musí být dostatečně tlustý, aby zabránil průrazu vlivem rozdílu potenciálu mezi elektrodami, což stanovuje určitou potřebnou hladinu jeho fyzické robustnosti.

3.3.4 Přeprava hmoty a koncentrační ztráty

Jestliže je kyslík na katodě dodáván ve formě směsi – vzduchu, potom je zřejmé, že během provozu palivového článku dojde k mírnému snížení koncentrace kyslíku v oblasti elektrody, jak je kyslík postupně odebírán. Rozsah této změny v koncentraci bude záviset na velikosti proudu odebíraném z palivového článku, na fyzikálních parametrech popisujících cirkulaci vzduchu na katodě článku a na tom, jak rychle může být kyslík doplněn. Tato změna v koncentraci způsobí snížení parciálního tlaku kyslíku.

Zcela obdobně to platí také pro anodu palivového článku.

V obou případech, pokles tlaku plynu vyústí v pokles napětí. Avšak prozatím neexistuje analytické řešení problému modelování změn napětí, jež bude uspokojivě fungovat pro všechny případy palivových článků. Existuje jeden přístup, který nám přináší dostatečně přesný vztah a hodnoty, a který současně respektuje vliv zmíněného poklesu tlaku (či parciálního tlaku). Tento vztah udává změnu napětí naprázdno palivového článku způsobenou změnou tlaku reaktantů a může být zapsán, viz. vztahy (3.8) a (3.9), ve tvaru:

$$(3.30) \quad \Delta U = \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

Změna tlaku z P_1 na P_2 způsobená využitím paliva může být odhadnuta následovně. Předpokládejme limitní proudovou hustotu i_l [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$], při které je palivo využíváno stejnou rychlostí, jako je maximální rychlost dodávky paliva. Proudová hustota tedy nemůže překročit tuto hodnotu, poněvadž palivový plyn nemůže být dodáván s větší rychlostí. Při této proudové hustotě může tlak paliva dosáhnout hodnoty 0 bar. Pokud tedy P_1 je tlak, při kterém je proudová hustota nulová, a při předpokladu, že tlak klesá k nule při proudové hustotě i_l lineárně, potom tlak P_2 odpovídající jakékoliv proudové hustotě i [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$] je vyjádřen vztahem:

$$(3.31) \quad P_2 = P_1 \cdot \left(1 - \frac{i}{i_1}\right).$$

Jestliže dosadíme tento vztah do vztahu pro pokles napětí článku, získáváme:

$$(3.32) \quad \Delta U = \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(1 - \frac{i}{i_1}\right).$$

Obecně můžeme říci, že koncentrační ztráty a ztráty způsobené přenosem hmoty jsou vyjádřeny vztahem pro změnu napětí:

$$(3.33) \quad \Delta U_{trans} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{i}{i_1}\right),$$

kde B je konstanta, jež je závislá na palivovém článku a stavu, při jakém je provozován [V].

Například, jestliže B je stanovena na 0,05 V a i_1 na 1 000 mA · cm⁻², potom získáme křivku, jež je velice podobná té na obrázku 3-3. Tento vztah se nezaobírá produkty reakce, kterým je například voda, a jejich odvodem z prostoru katody, nebo využitím dusíku v systému vzduchu.

Jiný přístup, jež nevychází z teoretic. základu, ale je zcela empirický, nám přináší vztah, jež velmi dobře postihuje výsledky měření (Kim a kol. (1995) a Laurencelle a kol. (2001)). Tento vztah můžeme zapsat následovně:

$$(3.34) \quad \Delta U_{trans} = m \cdot \exp(n \cdot i).$$

Hodnota konstanty m bývá obvykle kolem $3 \cdot 10^5$ V a konst. n okolo $8 \cdot 10^{-3}$ cm² · mA⁻¹.

Přestože poslední dva uvedené vztahy vypadají velmi odlišně, zvolíme-li pečlivě konstanty, poskytují nám obdobné výsledky. Nicméně, posledně uvedený vztah je používán pro dosažení výsledků, jež jsou bližší výsledkům měření.

Přeprava hmoty a koncentrační přepětí jsou důležité zvláště, když je vodík dodáván z reformeru, neboť zde může být velmi obtížný nárůst rychlosti dodávky vodíku jako rychlá odezva na požadavek dodávky elektrické energie. Zvláštním problémem je dusík, jež zůstává po využití kyslíku ze vzduchu, a jež může způsobit problémy při vysokých proudtech – efektivně blokuje dodávku kyslíku. V palivových článcích s protonovou membránou (PEM FC) vznikají též ztráty související s přepravou hmoty a koncentračním přepětí v důsledku vody tvořící se na straně katody.

3.3.5 Sloučení jevů způsobujících pokles napětí palivového článku

Na základě výše zmíněných jevů a jejich matematickým popisům můžeme sestavit vztah vyjadřující závislost provozního napětí paliv. článku v závislosti na jeho proudové hustotě i :

$$(3.35) \quad U = E - \Delta U_{Ohm} - \Delta U_{act} - \Delta U_{trans} = E - i \cdot r - A \cdot \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) + m \cdot \exp(n \cdot i).$$

V tomto vztahu vystupují následující veličiny:

E je vratné napětí naprázdno palivového článku [V],

i_n je ekvivalentní proudová hustota pro přechod vodíku elektrolytem a pro vnitřní proud palivového článku [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$],

A je konstanta v Tafelově rovnici [V].

i_0 je výměnná proudová hustota na katodě, pokud je přepětí na katodě mnohem vyšší než na anodě, nebo se může jednat o výměnnou proudovou hustotu, jež je funkcí přepětí na obou elektrodách [$\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$],

m a n ... jsou konstanty související s přepětím v důsledku přepravování hmoty článkem [$\text{V} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mA}^{-1}$].

r je měrný (plošný) odpor aktivní plochy palivového článku [$\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$].

Tento vztah je však velmi často zjednodušován dle užitečnosti a potřeby.

4 VYVEDENÍ ENERGIE Z PALIVOVÉHO ČLÁNKU

4.1 Úvod

V této kapitole se budeme zabývat základním významem palivových článků – výrobou elektrické energie. Budou zde také zmíněny prvky výkonové elektroniky, jež jsou zvláště důležité pro systémy palivových článků.

Palivové články sebou nesou některé speciální problémy, které jsme však schopni, díky využití standardních vybavení a metod využívaných v jiných částech elektroenergetiky, vyřešit. V následujícím přehledu jsou uvedeny čtyři základní technologie, jež jsou v oblasti elektroenergetiky palivových článků využívány nejčastěji:

1. *Regulace* – elektrický výkon vystupující z palivového článku nemá obvykle vhodné parametry, které navíc nejsou v čase konstantní. U všech generátorů elektrické energie vyvolá nárůst odebíraného proudu pokles jeho svorkového napětí. V případě palivových článků je tento pokles mnohem výraznější. Napětíové regulátory, DC/DC měniče a pulzní měniče jsou použity k řízení a nastavení hladiny napětí palivového článku na fixní hodnotu, jež může být vyšší či nižší než je provozní napětí palivového článku. Tyto obvody jsou popsány v části 4.2.

2. *Střídač* – palivové články vyrábějí stejnosměrnou elektrickou energii. V mnoha případech, speciálně pro malé systémy, je to výhoda. Nicméně, pro velké systémy, jež jsou připojeny k elektrické distribuční soustavě, musí být energie stejnosměrná DC transformována na energii střídavou. Střídače, pomocí kterých je elektrická energie konvertována jsou podrobně popsány v části 4.3.

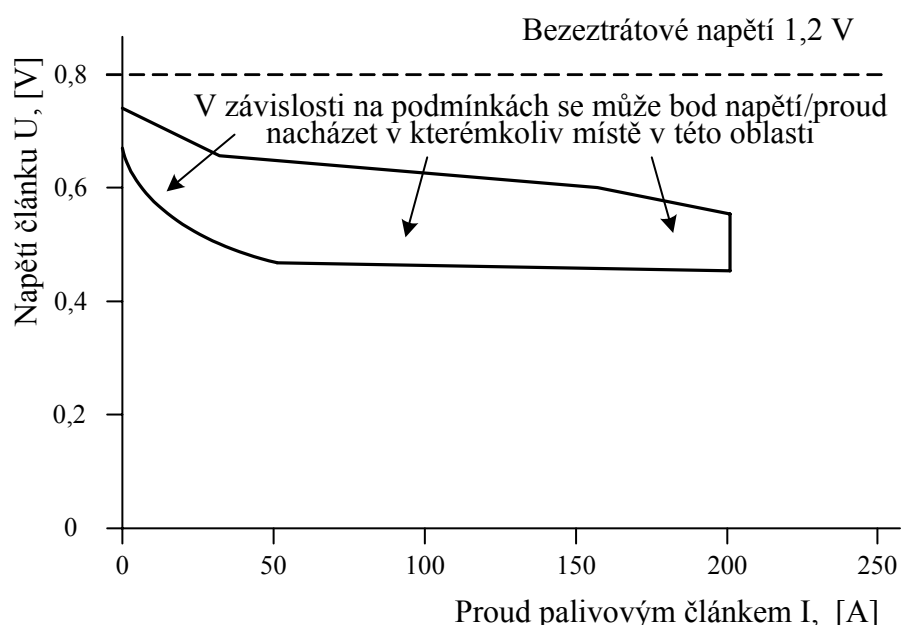
3. *Elektrické motory* – jednou z hlavních oblastí aplikací palivových článků je doprava, ve které je elektrická energie dodávána elektrickému motoru. Navíc, motory jsou velmi často zapotřebí k pohánění kompresorů a pump uvnitř samotného systému palivového článku. Většina systémů s palivovým článkem s výkonem větším či okolo 1 kW obsahují nejméně tři elektrické motory. Nástup levných výkonových zařízení a řídicích systémů vedl k vývoji nových typů motorů s velmi vysokými účinnostmi. V kapitole 4.4 bude uveden přehled těchto moderních elektrických motorů a jejich řídicích systémů, se zaměřením na jejich aplikaci v systémech palivových článků.

4. *Hybridní systém* – z hlediska ceny na watt jsou palivové články velmi drahé. V mnoha aplikacích, například v dopravě a komunikačních přístrojích, je průměrná potřebná energie nižší než energie špičková. V těchto případech mohou být navrženy nízko-nákladové systémy využívající baterie (kondenzátory) s palivovým článkem jako hybridní systém. V podstatě, palivové články jsou provozovány s průměrným výkonem a s baterií či kondenzátorem vykrývajícím výkon špičkový.

4.2 Regulace stejnosměrného napětí

4.2.1 Spínací zařízení

Napětí ze všech zdrojů elektrické energie se mění s časem, teplotou a mnoha dalšími činiteli, zvláště pak s proudem. Obrázek 3-1 sumarizuje data ze skutečného palivového článku s výkonem 250 kW použitého v dopravním prostředku (autobus) (Spiegel a kol., 1999). Napětí se mění od hodnoty okolo 400 V do hodnoty vyšší jak 750 V, a můžeme také vidět, že napětí může dosahovat různých hodnot při stejném proudu. Je to dáno tím, že stejně jako proud je i napětí závislé na teplotě, tlaku vzduchu, ale třeba i na tom, jestli kompresor v systému palivového článku zrychlil, a na spoustě dalších činitelů.

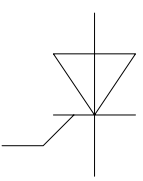
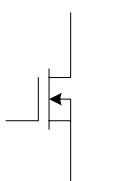
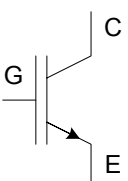


Obrázek 4-1 Graf znázorňující souhrn naměřených dat ze skutečného palivového článku s výkonem 250 kW pro napájení pohonu v autobusu (získáno z dat Spiegel a kol. (1999)).

Většina elektronických a elektrických zařízení vyžaduje relativně konstantní napětí. Toho můžeme dosáhnout snížením napětí na pevnou hodnotu nacházející se pod rozsahem provozního napětí palivového článku, či jeho navýšením na pevnou hodnotu. Toho je docíleno prostřednictvím spínacích a pulzních obvodů, jež jsou popsány níže. Tyto obvody, stejně jako měniče a řídicí systémy motorů, používají elektronické spínače.

V následující části si v rychlosti popíšeme hlavní typy používaných elektronických spínačů, zmíníme se o jejich výhodách a nevýhodách. Přehled tří nejdůležitějších elektronických spínačů včetně jejich parametrů je uveden v tabulce 4-1.

Tabulka 4-1 Klíčová data pro hlavní typy elektronických spínačů použitých v moderních výkonových elektronických zařízeních

Typ spínacího prvku	Tyristor	MOSFET	IGBT
Symbol			
Maximální napětí [V]	4 500	1 000	1 700
Maximální proud [A]	4 000	50	600
Spínací čas [μ s]	10 - 25	0,3 – 0,5	1 - 4

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) je založen na základě přivedení napětí, obvykle mezi 5 a 10 V, na hradlo (gate - G). Když je zapnutý, odpor mezi kolektorem (drain - D) a emitorem (source - S) je velmi nízký. Výkon požadovaný pro zajištění nízké hodnoty odporu je velmi malý, stejně jako proud tekoucí do hradla. Nicméně, báze má významnou kapacitu, takže jsou obvykle použity speciální budicí obvody. Proudová cesta se chová jako rezistor, jehož hodnota je v zapnutém stavu $R_{DS(on)}$. Hodnota $R_{DS(on)}$ pro MOSFET tranzistory použité v napěťových regulačních obvodech bývá okolo 0,01 Ω . Nicméně takovéto malé hodnoty jsou možné pouze v zařízeních, jež jsou schopny spínat nízké napětí, v oblasti 50 V. Zařízení, jež jsou schopna spínat napětí vyšší, mají hodnotu $R_{DS(on)}$ okolo 0,1 Ω , což způsobuje vyšší ztráty. MOSFET tranzistory jsou široce používány v nízkonapěťových systémech s výkonem nižším než 1 kW.

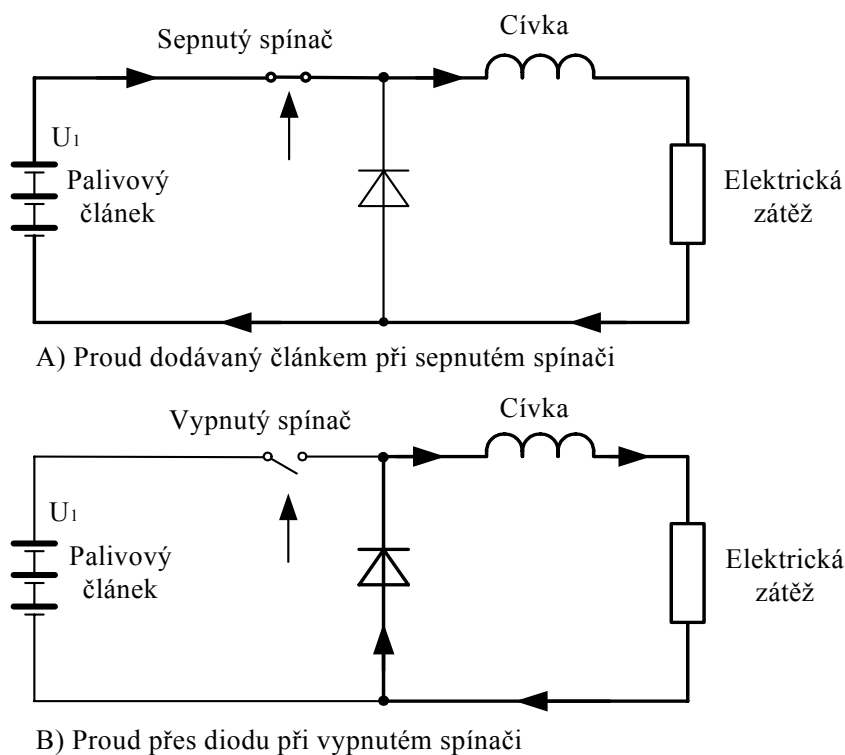
Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) je v podstatě tvořen obvodem kombinujícím konvenční bipolární tranzistor a MOSFET tranzistor, a dosahuje výhod obou těchto typů. Abychom je mohli zapnout (uvést do chodu) požadují docela nízké napětí se zanedbatelným proudem na bázi (gate - G). Hlavní proud tekoucí tranzistorem je z kolektoru do emitoru, přičemž tato cesta má charakteristiku přechodu P-N. To znamená, že úbytek napětí nenarůstá příliš nad hodnotu 0,6 V pro všechny velikosti proudů uvnitř pracovní oblasti zařízení. Z toho důvodu jsou tyto tranzistory upřednostňovány v systémech, ve kterých je proud vyšší jak 50 A. Jsou též schopné odolávat vyšším napětím. Delší spínací časy ve srovnání s MOSFET tranzistory, jež jsou zobrazeny v tabulce 4-1, jsou nevýhodné v systémech s malými výkony. Nicméně, IGBT tranzistory jsou téměř univerzálně využívané spínače v systémech s výkonem od 1 kW do několika stovek kW.

Tyristor byl a stále je nejvyužívanějším spínacím prvkem běžně používaný ve výkonové elektronice. Narozdíl od MOSFET a IGBT tranzistorů, tyristor může být využit pouze jako elektronický spínač – nevyskytuje se v jiných aplikacích. Přechod z blokujícího do vodivého stavu je spouštěn pulzem elektrického proudu na bázi (gate). Tyristor zůstává ve vodivém stavu do doby, než proud jím procházející klesne na nulu. Tento rys je činí obzvláště užitečnými v obvodech na úpravu AC signálů, ve kterých jsou stále hojně používány. Nicméně, různé

varianty tyristorů, obzvláště Gate-Turn-Off (GTO) tyristor je schopný vypnutí, dokonce i když protéká příslušným zařízením proud, přivedením záporného pulzu proudu na gate. Navzdory skutečnosti, že spínání je dosaženo pouze díky pulzu proudu, energie potřebná pro toto vypnutí je mnohem větší než v případě MOSFET a IGBT tranzistorů. Kromě toho, spínací časy jsou výrazně delší. Jedinou výhodou tyristoru (různých jeho typů) pro spínání stejnosměrného napětí je, že může spínat vyšší napětí a větší proudy. Maximální energie IGBT tranzistorů je v současné době tak vysoká, že je celkem nepravděpodobné jejich použití v systémech s výkony nižšími jak 1 MW.

Spínané regulátory

Principu funkce spínaného regulátoru je znázorněn na obrázku 4-2. Nezbytnou součástí je elektronický spínač s přidruženým pomocným (hnacím) obvodem, diodou a cívkou.



Obrázek 4-2 Schématické diagramy znázorňující provoz regulátoru ve spínacím módu.

Na obrázku 4-2 je znázorněn propustný spínaný regulátor. V případě 4-2a je spínač sepnutý. Proud prochází cívkou a elektrickou zátěží. Cívka indukuje zpětné elektromotorické napětí (EMF), jež způsobí, že nárůst proudu je postupný. Spínač je následně vypnut. Energie uskladněná v cívce udržuje proud protékající elektrickou zátěží využívající přitom diody. Tento stav je znázorněn na obrázku 4-2b. Na obrázku 4-3 je znázorněn časový průběh proudů protékajících elektrickým obvodem v průběhu každé části cyklu zapnutí-vypnutí. Napětí na zátěži může být mnohem více vyhlazené při použití kondenzátorů.

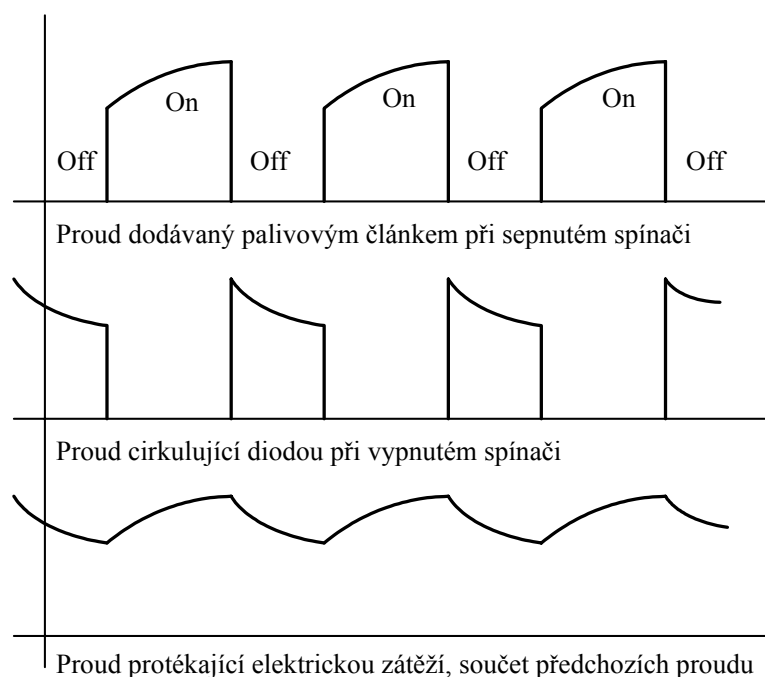
Jestliže U_1 [V] je napětí palivového článku a časy pro zapnutí a vypnutí elektronický spínač jsou t_{ON} [s] a t_{OFF} [s], potom výstupní napětí U_2 [V] dosahuje hodnoty:

$$(4.1) \quad U_2 = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot U_1.$$

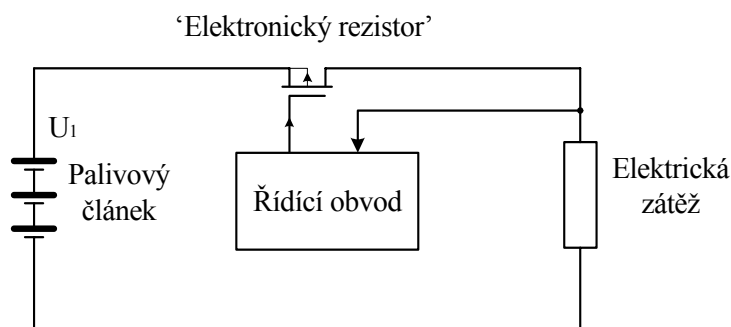
Je zřejmé, že zvlnění výstupního napětí závisí na frekvenci spínání – při vyšších frekvencích je zvlnění nižší. Nicméně, každé zapnutí a vypnutí zahrnuje ztráty energie, takže tato frekvence by neměla být zase až příliš vysoká. Pro naladění t_{ON} na takovou hodnotu, jež je vhodná pro požadované výstupní napětí, slouží řídicí obvod. Takové obvody jsou dostupné od různých výrobců. Hlavními energetickými ztrátami v obvod regulátoru jsou:

- výkonová ztráta ve spínači při jeho zapnutí ($0,6 \times I$ u IGBT či $R_{DS(on)} \times I^2$ pro MOSFET tranzistory),
- energie zmařená v odporu cívky,
- ztráty v diodě, $0,6 \times I$.

V praxi mohou být všechny tyto ztráty sníženy. Účinnost takového spínacího obvodu by měla přesáhnout 90 %. Ve vysokonapěťových systémech, okolo 100 V a více, je možno dosáhnout účinnosti až 98 %.



Obrázek 4-3 Proudů ve snižovacím módu spínače regulačního obvodu.



Obrázek 4-4 Lineární regulační obvod.

Další možností regulace napětí je lineární regulační obvod. Princip tohoto obvodu je ukázán na obrázku 4-4. Je zde opět použit tranzistor, avšak v tomto případě není spínán naplno ON a OFF. Napětí na hradle je vyladěno tak, že jeho odpor odpovídá poklesu napětí na požadovanou hodnotu. Tento odpor se mění plynule v závislosti na proudu elektrickou zátěží a na připojeném napětí palivového článku. Tento regulační obvod je široce rozšířen v elektronických systémech, avšak nikdy by neměl být použit s palivovými články. Jednoduchá přeměna nadbytečného napětí na teplo snižuje napětí a plýtvá energií. Palivové články jsou a vždy budou používány v systémech, u kterých je nejdůležitější účinnost. Z tohoto důvodu nemají lineární regulační obvody v těchto systémech místo.

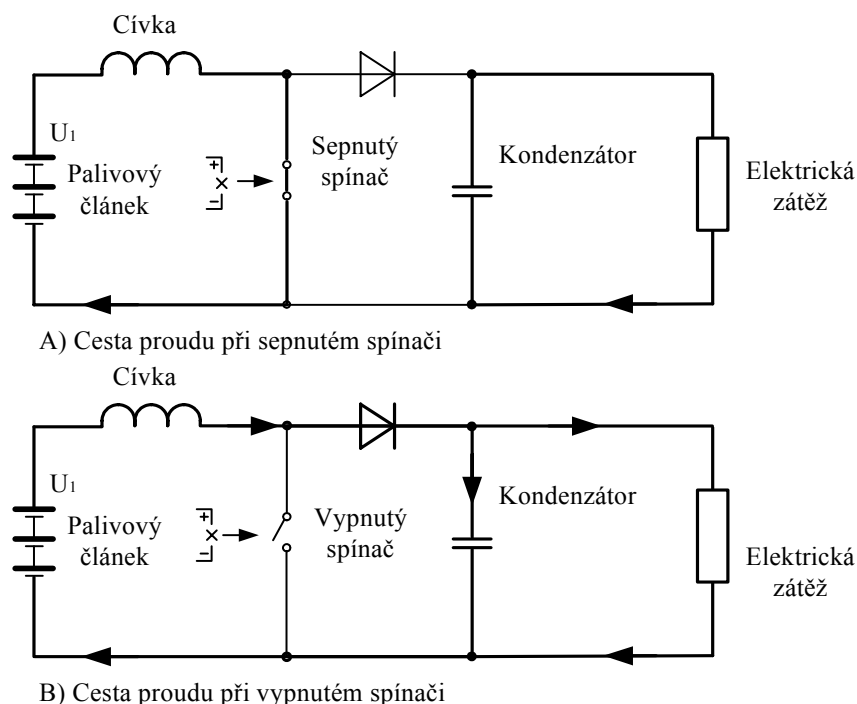
Poněvadž palivové články jsou zásadně nízkonapěťová zařízení, je velmi často požadováno navýšení tohoto napětí. To může být provedeno, docela jednoduše a efektivně, prostřednictvím blokujících spínaných obvodů. Obvykle používaný obvod tohoto typu je znázorněn na obrázku 4-5.

Naše vysvětlování začneme předpokladem, že kondenzátor je nabit. V obrázku 4-5a je spínač zapnutý a elektrický proud je dán parametry cívky. Elektrická zátěž je napájena z kondenzátoru. Dioda zabráňuje zpětnému průchodu náboje přes spínač. V obrázku 4-5b je vypínač vypnutý. Dochází k rychlému nárůstu napětí na cívce v důsledku poklesu proudu. V okamžiku, kdy tato hodnota napětí překročí napětí na kondenzátoru (plus 0,6 V pro diodu), začne diodou procházet proud, jež současně začne nabíjet kondenzátor a napájet elektrickou zátěž. Tato část cyklu bude probíhat tak dlouho, dokud je v cívce dostatek energie. Následně dochází k opětovnému sepnutí spínače, jak je znázorněno v obrázku 4-5a, a cívka je dobíjena za současného napájení elektrické zátěže z kondenzátoru.

Vyšší napětí jsou dosažena zkrácením doby vypnutí spínače. Můžeme si ukázat, že pro ideální bezztrátový měnič:

$$(4.2) \quad U_2 = \frac{t_{ON} + t_{OFF}}{t_{ON}} \cdot U_1.$$

Ve skutečnosti je napětí poněkud nižší, než je hodnota vyplývající z tohoto vztahu. Stejně jako v případě snižovacího propustného spínače, řídicí systémy u blokujících zvyšovacích spínaných regulátorů jsou v současné době vyráběny a dodávány řadou výrobců.

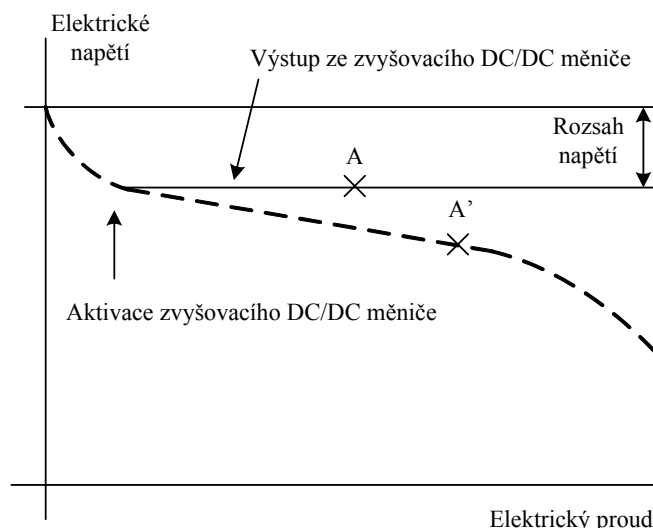


Obrázek 4-5 Schématické diagramy pro ukázkou provozu spínacího módu zvyšovacího regulátoru.

Zdroje ztrát v tomto obvodu mají stejný původ, jako v případě obvodu snižovacího (propustného) regulátoru. Protože proud tekoucí cívkou a spínačem je vyšší než proud výstupní, ztráty tohoto regulátoru jsou poněkud vyšší. Také veškerý náboj protékající v tomto čase diodou je důvodem poklesu napětí o 0,6 V a tudíž i ztráty energie. Výsledkem je, že účinnost blokujících regulátorů je poněkud nižší než je tomu v případě regulátorů propustných. Nicméně, účinnosti přes 80 % by mělo být bez problémů dosaženo.

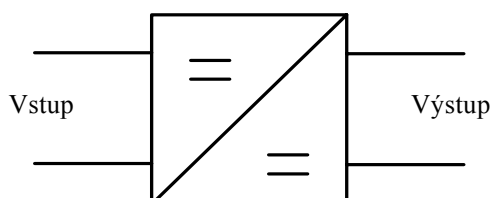
Třetí možností je použití propustně-blokujícího regulátoru. V tom případě je výstup umístěn někde v rozsahu provozního napětí palivového článku. Poněvadž takovéto obvody jsou technicky proveditelné, jejich účinnost směřuje k nižším hodnotám, určitě horším než v případě blokujícího spínaného obvodu. Tento typ regulátoru tedy není příliš vhodný pro regulátory použité v systémech s palivovými články. Propustně-blokující regulátor nachází uplatnění v aplikacích, u kterých je vyžadována malá proměnlivost výstupního napětí.

Pro vysoké proudy je používán vysokofrekvenční pulzní obvod. K němu se váže průběh napětí znázorněný na obrázku 4-6. Při nižších proudech není napětí regulováno. Obvod na obrázku 4-5 se používá se spínačem nacházejícím se v trvale vypnutém stavu. Nicméně, měnič je uveden do provozu v okamžiku, kdy napětí palivového článku klesne pod nastavenou hodnotu. Při malém posuvu bude účinnost vyšší.



Obrázek 4-6 Voltampérová charakteristika palivového článku se zvyšovacím pulzním obvodem, jež reguluje napětí na hodnotu o trochu nižší, než je maximální napětí stacku.

Měli bychom zdůraznit, že proud vystupující ze zvyšujícího měniče je nižší než v případě proudu vstupujícího do měniče. Dle 4-6, jestliže je palivový článek provozován v pracovním bodě A, výstupní napětí bude vyšší než napětí palivového článku avšak proud bude nižší. Systém též není naprosto bezztrátový ani v případě, kdy měnič nepracuje. Celý proud bude protékat cívkou a diodou, což vyústí ve ztráty energie.



Obrázek 4-7 Typické označení DC/DC měniče a střídače palivového článku

Zvyšující a snižující spínací a pulzní obvody se nazývají DC/DC měniče. Jejich symbol (označení) používaný ve schématech je znázorněno na obrázku 4-7.

4.3 Střídače

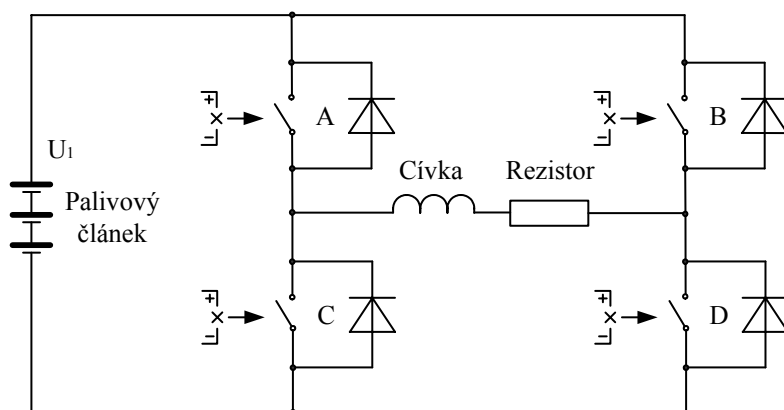
4.3.1 Jednofázové střídače

Palivové články jsou velmi často využívány v systémech kombinované výroby elektrické energie a tepla (CHP), a to jak v domácnostech, tak i v obchodní sféře. V těchto systémech je

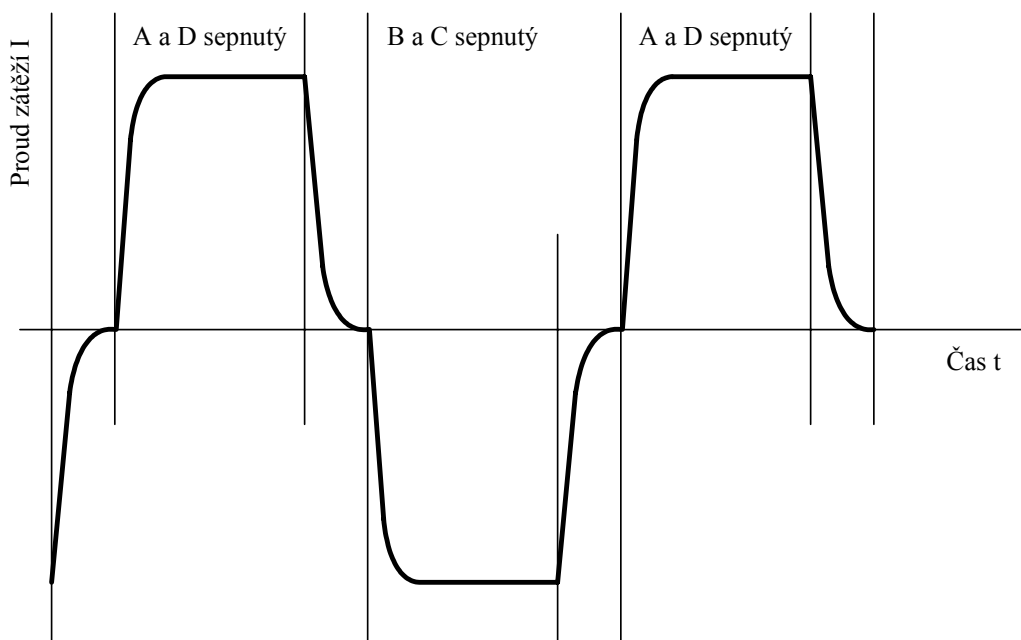
zapotřebí, aby byl palivový článek připojen do střídavé elektrické sítě. Stejnoseměrné výstupní napětí může být také přeměněno na střídavé napětí pro izolované elektrické sítě.

V malých domovních systémech je výstupní napětí článku přeměněno na jednofázové střídavé napětí. Ve velkých průmyslových systémech budou palivové články zapojeny do třífázového zásobujícího systému, jež je podrobněji rozebrán v části 4.3.2.

Uspořádání klíčových komponentů jednofázového střídače je znázorněno na obrázku 4-8. V tomto obrázku jsou patrné čtyři elektronické spínače, označené A, B, C a D, zapojené v takzvaném **H-můstku**. Každý spínač je přemostěn diodou, jejíž význam si objasníme později. Rezistor a cívka představují zátěž, přes kterou je můstek řízen.



Obrázek 4-8 Obvod střídače s H-můstkem pro výrobu jednofázového střídavého napětí.



Obrázek 4-9 Časový průběh proudu pro obdélníkový spínaný jednofázový střídač.

Princip funkce střídače je docela jednoduchý. V prvním okamžiku jsou spínače A a D zapnuty a proud protéká přes zátěž ve směru zleva doprava. Oba tyto spínače jsou následně

vypnuty. V tomto okamžiku vidíme význam diod. Elektrická zátěž má pravděpodobně určitou indukčnost a tím pádem není proud tekoucí zátěží přerušen okamžitě, ale protéká dále ve stejném směru, přes diody přemostňující spínače B a C, zpět do zdroje. Následně jsou zapnuty spínače B a C, a proud protéká v opačném směru, zprava doleva. V okamžiku, kdy jsou tyto spínače vypnuty, proud teče okruhem přes diody přemostňující spínače A a D.

Tvar výsledné křivky proudu je zobrazen na obrázku 4-9. Je patrné, že tento průběh je velice vzdálen od čisté sinusovky.

Rozdíl mezi čistou sinusovkou a jakýmkoliv jiným tvarem křivky je vyjádřen prostřednictvím harmonických. Jedná se o sinusové kmity napětí či proudu, jejichž frekvence, f_v , je celočíselným násobkem základní frekvence sítě (základní harmonické). Můžeme si ukázat, že jakýkoliv periodický tvar křivky může být představován přičtením určitého počtu harmonických k základní sinusovce. Proces nalezení těchto harmonických je označován pojmem Fourierova analýza (Fourierův rozklad). Je dokázáno, že obdélníkový průběh o frekvenci f může být vyjádřen pomocí vztahu:

$$(4.3) \quad v = \sin(\omega \cdot t) - \frac{1}{3} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t) - \frac{1}{7} \cdot \sin(7 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{9} \cdot \sin(9 \cdot \omega \cdot t) \dots,$$

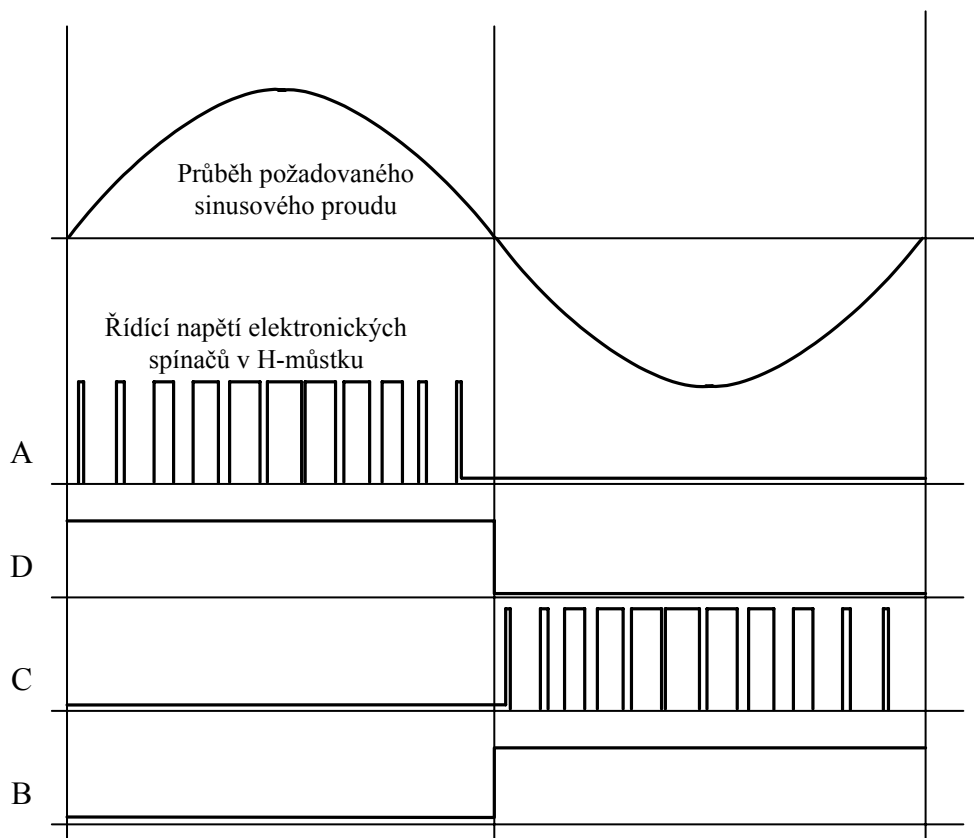
kde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ je úhlová frekvence ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$).

Takže rozdíl mezi napěťovou a proudovou křivkou a čistou sinusovkou může být vyjádřen prostřednictvím složení základní harmonické s vysokofrekvenčními harmonickými. Problémem je, že tyto vysokofrekvenční harmonické mohou škodlivě působit na další zařízení připojená do elektrické sítě, na kabely a rozváděče vystavené vysokofrekvenčním harmonickým. Mezi nejzávažnější poruchy patří možné zničení ochranného zařízení a porucha řídicích systémů. Mohou též způsobit neúčinnosti v elektrických motorech, nepříjemný zvuk ve všech typech strojů, zničení počítačů a dalšího elektronického zařízení, rušení obrazu televizoru a další nežádoucí vlivy. Z toho důvodu jsou v současnosti používány regulace zabezpečující čistotu křivky AC proudu dodávaného do elektrické sítě. Bohužel, tyto standardy jsou závislé na zvyklostech různých států a různých jiných okolnostech. Nicméně, jsou vyjádřeny prostřednictvím amplitud jednotlivých harmonických ve vztahu k amplitudě základní harmonické. V České republice se kvalitou elektrické energie zabývá norma z roku 2000 ČSN EN 50160 (330122): "Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě".

Jak je patrné ze vztahu (4.3), obdélníková křivka překračuje limit třetí harmonické stejně jako v případě ostatních harmonických. Jak tedy může být vyráběna čistější křivka napětí a proudu? Používají se dva postupy, **pulzně-šířková modulace** a modernější **technika pulzního střídače s tolerančním pásmem**.

Princip pulzně-šířkové modulace je ukázán na obrázku 4-10. Je použit stejný obvod, jaký je znázorněn na obrázku 4-8. V případě kladného cyklu je spínač D sepnutý trvale, zatímco spínač A je spínán přerušovaně. Když je spínač A sepnutý, proud prochází elektrickou zátěží. Když je spínač A vypnutý, proud v důsledku indukčnosti zátěže dále protéká skrz spínač D a nezávislou diodu přemostňující spínač C, podél dolní pravé smyčky obvodu.

V případě záporného cyklu je vyskytující se proces obdobný, avšak tentokrát je trvale sepnut spínač B a spínač C je spínán přerušovaně. Pokud je spínač C sepnutý, proud teče do zátěže, a v okamžiku jeho vypnutí, proud protéká stále, ačkoliv dochází k jeho poklesu, přes horní smyčku v obvodu a přes diodu, jež přemostňuje spínač A.

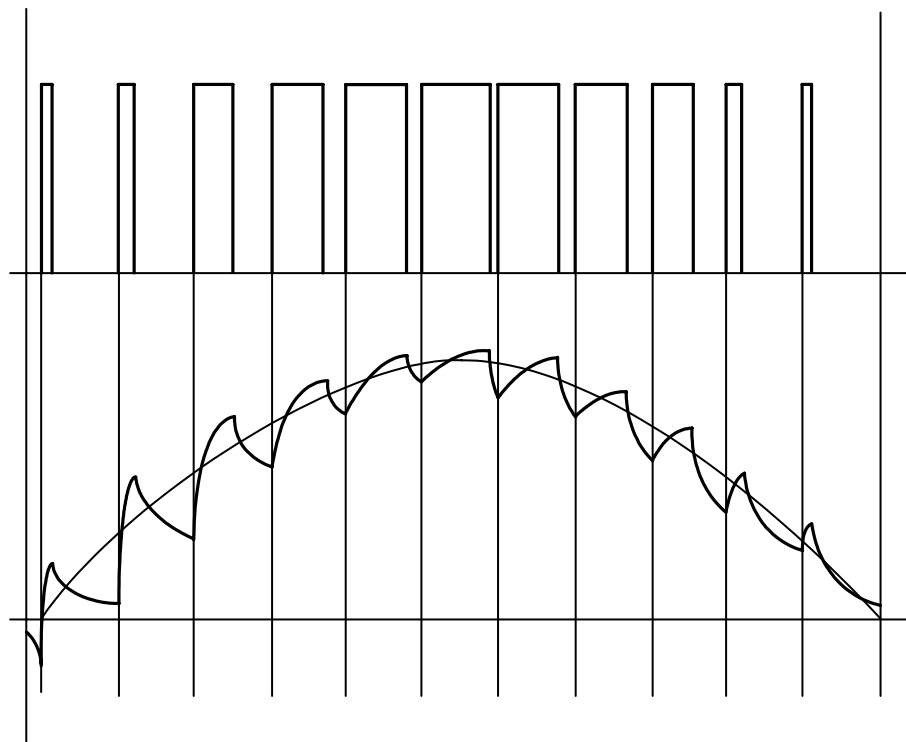


Obrázek 4-10 Pulzně-šířková modulační spínací sekvence pro výrobu přibližně sinusového střídavého proudu v obvodu na obrázku 4-8.

Přesnost tvaru křivky bude záviset na povaze elektrické zátěže (odpor, indukčnost, kapacita). Typická polovina cyklu je znázorněna na obrázku 4-11. Křivka sice stále není přesnou sinusovkou, avšak je jí mnohem bližší než křivka na obrázku 4-9. Samozřejmě, čím více pulzů bude v každém cyklu, tím více se bude tvar křivky podobat čisté sinusovce a tím nižší budou jednotlivé harmonické. Běžně používaným standardem je 12 pulzů na cyklus, což nám dává uspokojivé výsledky.

V moderních systémech jsou spínací pulzy generovány obvody s mikroprocesory. To vede k přijetí inteligentnějšího přístupu spínání střídačů nazývaného pulzní metoda s tolerančním pásmem. Tato metoda je znázorněna na obrázku 4-12. Výstupní napětí je průběžně monitorováno a srovnáváno s vnitřní 'horním limitem' a 'dolním limitem', jež jsou sinusové časové funkce. V kladné části cyklu (obrázek 4-8) je spínač D trvale sepnutý. Spínač A je sepnut a tím dochází k nárůstu proudu elektrickou zátěží. V okamžiku dosažení horního limitu je spínač A vypnut, avšak proud protéká dále při současném poklesu, prostřednictvím diody přemostřující spínač C, jako v předchozím případě. Pokud je dosažen spodní limit, spínač A je opět sepnut a

proud začne opět procházet zátěží. Tento proces je trvale opakován, s napětím rostoucím a klesajícím mezi tolerančními hranicemi pásma.



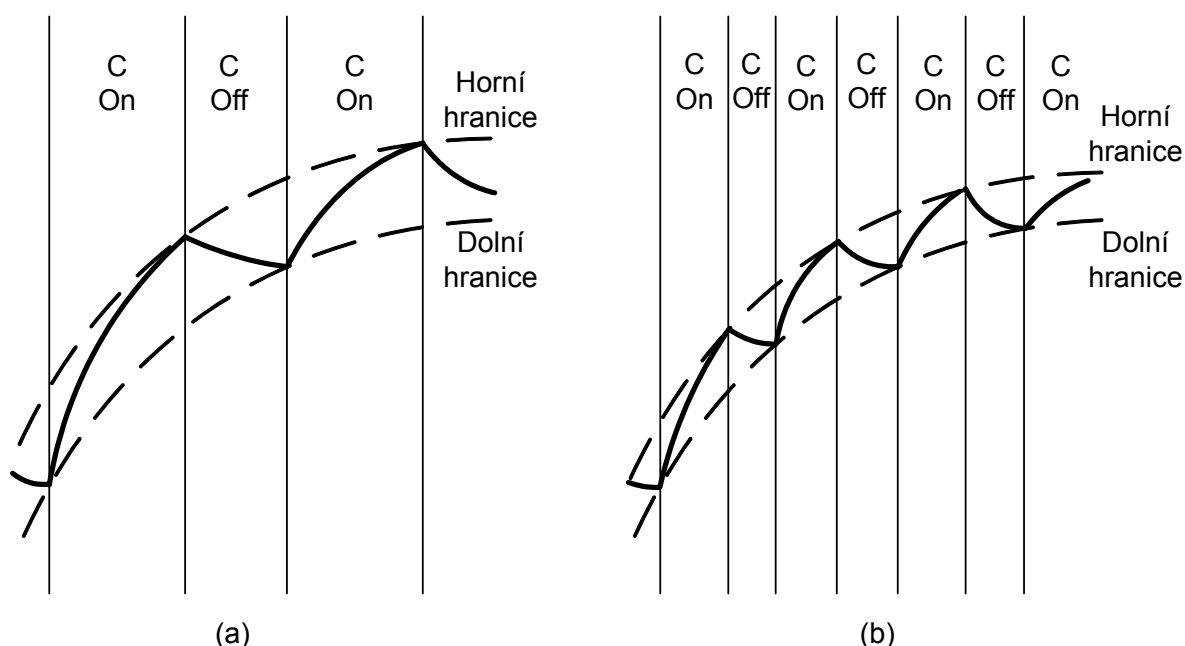
Obrázek 4-11 Typický časový průběh napětí pro střídač s pulzně-šířkovou modulací.

V moderních systémech jsou spínací pulzy generovány obvody s mikroprocesory. To vede k přijetí inteligentnějšího přístupu spínání střídačů nazývaného pulzní metoda s tolerančním pásmem. Tato metoda je znázorněna na obrázku 4-12. Výstupní napětí je průběžně monitorováno a srovnáváno s vnitřní 'horní hranicí pásma' a 'dolní hranicí pásma', jež jsou sinusové časové funkce. V kladné části cyklu (obrázek 4-8) je spínač D trvale sepnutý. Spínač A je sepnut a tím dochází k nárůstu proudu elektrickou zátěží. V okamžiku dosažení horního limitu je spínač A vypnut, avšak proud protéká dále při současném poklesu, prostřednictvím diody přemostňující spínač C, jako v předchozím případě. Pokud je dosažen spodní limit, spínač A je opět sepnut a proud začne opět procházet zátěží. Tento proces je trvale opakován, s napětím rostoucím a klesajícím mezi tolerančními hranicemi pásma.

Na obrázku 4-12 je znázorněn cyklus zapnutí/vypnutí, v případě (a) pro široké toleranční pásmo a v (b) pro úzké toleranční pásmo. Měli bychom brát ohled též na odpor a indukčnost elektrické zátěže, která svými parametry ovlivňuje tvar křivky a tudíž i frekvenci spínání spínačů. Jedná se tedy o jakýsi adaptivní systém, jež trvale udržuje odchylku od sinusovky, a tudíž nechťené harmonické, pod požadovanými hodnotami.

Jedinou podstatnou nevýhodou metody regulace s tolerančním pásmem je velikost pulzní frekvence, která může dosahovat vysokých hodnot. Poněvadž většina ztrát v systému se vyskytuje v průběhu spínání, tedy při přechodu tranzistoru ze stavu off do stavu on a naopak, vede tato vysoká frekvence ke snížení účinnosti střídače. Přestože odzkoušená metoda pulzně-šířkové modulace je stále široce používána, metoda tolerančního pásma se díky svým

vlastnostem stává čím dál více oblíbenější, obzvláště v případech, kdy je zdroj napětí připojen k elektrické síti.

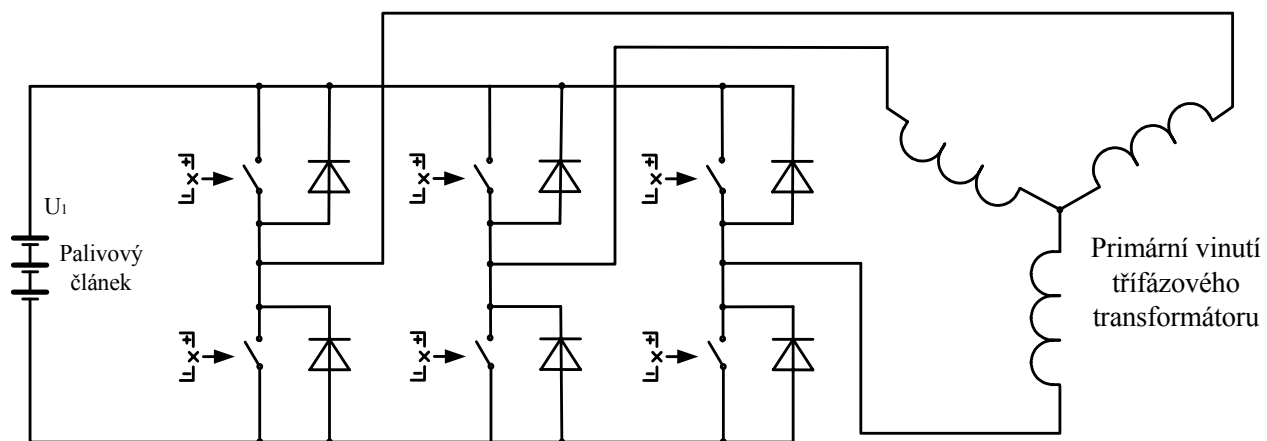


Obrázek 4-12 Typická křivka (časový průběh) napětí při použití techniky pulzního střídače s tolerančním pásmem.

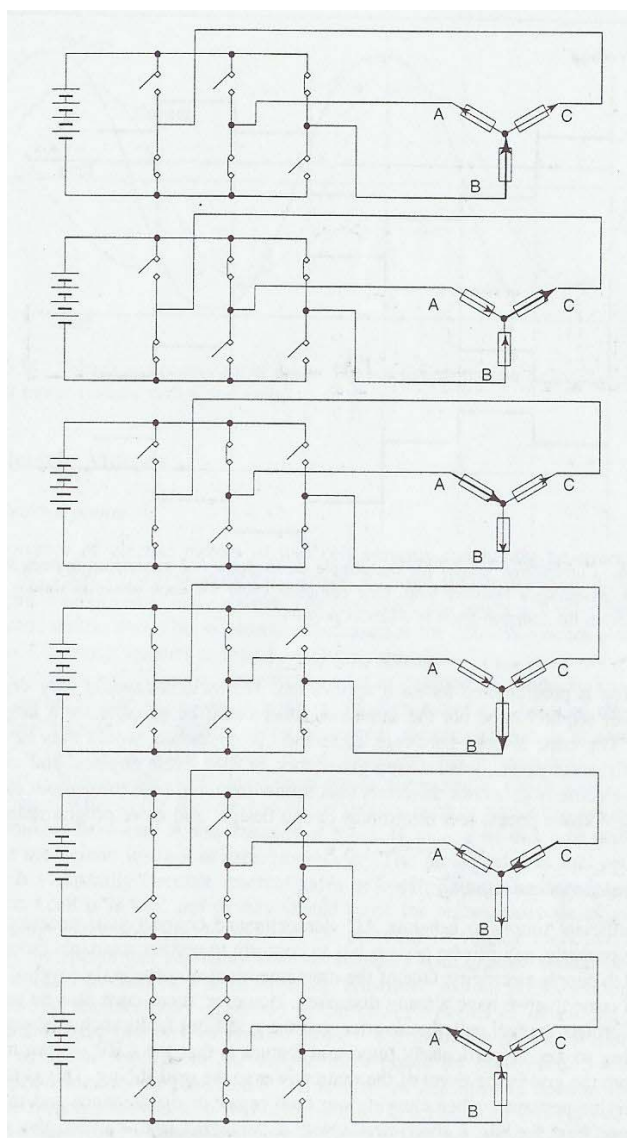
4.3.2 Třífázové střídače

Téměř všude na světě je elektrická energie vyráběna a rozváděna prostřednictvím tří paralelních obvodů, přičemž napětí v každé fázi je posunuté od napětí následující fáze o 120° . Zatímco většina domácností je napájena pouze jednou fází, většina průmyslových podniků má využívá tři fáze. Takže v případě průmyslových CHP systémů je zapotřebí stejnosměrné napětí z palivového článku transformovat na třífázové střídavé napětí.

Tento případ je pouze o trochu komplikovanější než je tomu v případě jedné fáze. Základní obvod je znázorněn na obrázku 4-13. Šest spínačů s blokujiícími diodami je připojeno na primární vinutí třífázového transformátoru, jež je znázorněno v pravé části obrázku. Způsob, jakým jsou tyto spínače použity k výrobě třífázového napětí, avšak s odlišnými fázemi, je uveden na obrázku 4-14. Každý cyklus může být rozdělen do šesti kroků. Graf na obrázku 4-15 ukazuje, jak se proud v každé ze tří fází tohoto jednoduchého uspořádání mění v čase. Tyto křivky jsou samozřejmě velice vzdáleny sinusovkám. V praxi je tato velmi jednoduchá spínací sekvence znázorněná na obrázku 4-14 upravena, použitím pulzně-šířkové modulace či metody tolerančního pásma, stejně jako tomu bylo v případě jednofázových střídačů popsaných výše.

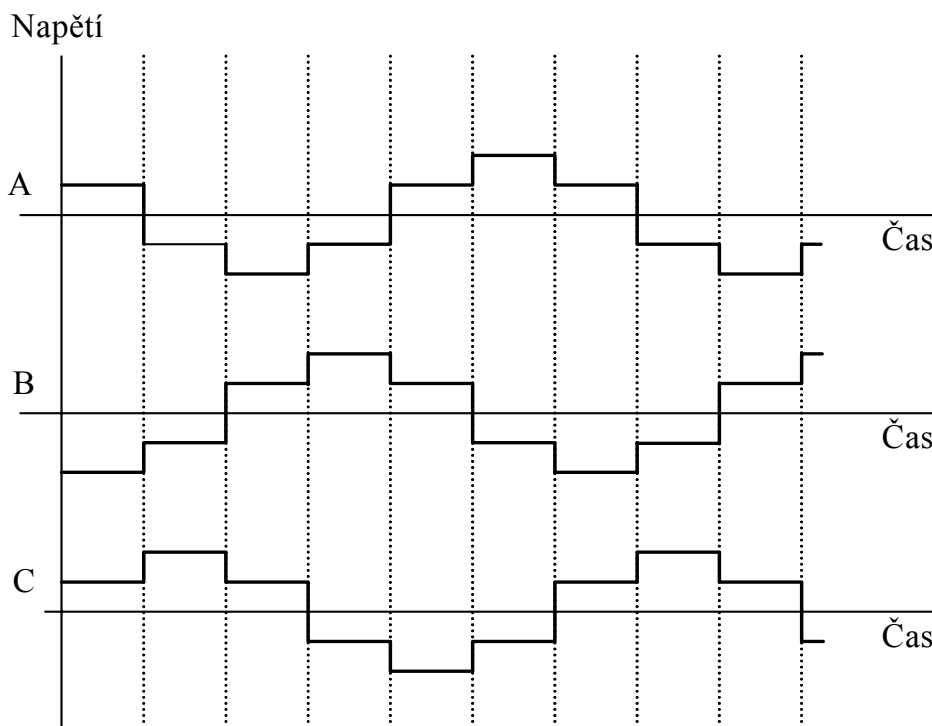


Obrázek 4-13 Obvod jednoduchého třífázového střídače.



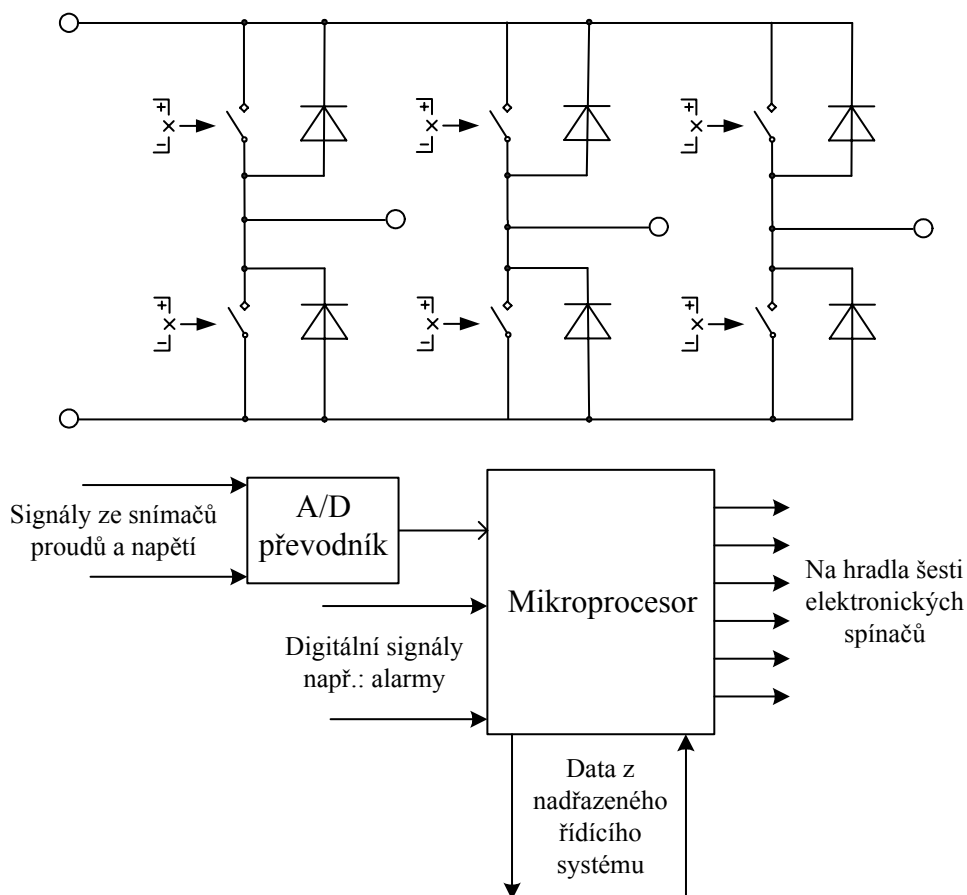
Obrázek 4-14 Postup při tvorbě třífázového spínacího (napětí) proudu.

Moderní třífázový měnič pro velké i malé výkony je postaven na obdobných základech, navíc může být komutován pomocí sítě (např.: časové signály jsou odvozeny z elektrizační soustavy, ke které jsou připojeny) či komutován samostatně (např.: nezávislé na elektrizační soustavě). Základní obvod je znázorněn na obrázku 4-16.



Obrázek 4-15 Časový průběh proudu pro jednoduchý systém výroby třífázového střídavého napětí s předpokladem odporové zátěže.

Signály používané pro sepnutí a rozepnutí spínačů jsou získávány z mikroprocesoru. Napěťové a proudové výstupní signály mohou být získány ze tří fází, ze vstupu spínačů či z jiných míst. Mohou být použity též digitální signály z ostatních snímačů. Také příkazy a informace mohou být posílány a obdrženy z dalších částí systému. Využití těchto informací může být pro jednotlivé případy zcela odlišné, avšak hardware bude v zásadě tentýž – obvod na obrázku 4-16. Jednotky měniče se tudíž stejně jako spousta dalších elektronických zařízení staly standardní součástí hardwaru, jež mohou být programovány pro každou aplikaci. Spínače se mění v závislosti na požadavcích na výkon, zatímco řídicí prvek je vhodný pro široký rozsah výkonů. To samé zařízení měniče (hardware), avšak různě naprogramované, je vhodné pro palivové články, sluneční panely, větrné generátory, motory se Stirlingovým cyklem, a spousta dalších zdrojů elektrické energie. Měníče tedy následují trend procházející přes celý obor elektroniky – nižší ceny, jednodušší vzhled elektronického obvodu a více programování.



Obrázek 4-16 Univerzální obvod třífázového měniče.

4.4 Elektrické motory

4.4.1 Obecný úvod

Význam elektrických motorů v systémech s palivovými články může být jen těžko zveličován. Motory v palivových člancích jsou obvykle použity pro cirkulaci reagujících plynů či chladicího média, a jsou v provozu po celou dobu chodu palivového článku, a tudíž musí mít co nejvyšší účinnost a co nejdelší životnost. Navíc, přítomnost těkavých paliv jako je vodík znamená, že k jiskrám, jež se nevyhnutelně příležitostně vyskytnou na kartáčích, nesmí dojít. Z toho důvodu budeme v následující části rozebírat pouze bezkartáčové motory.

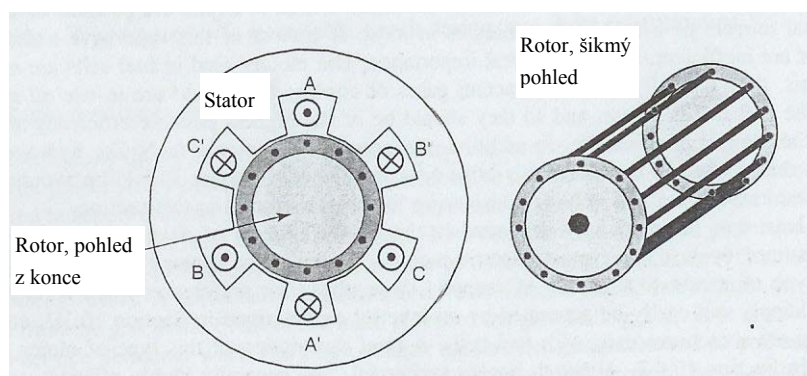
Nejméně polovina elektrické energie vyráběné ve výkonových systémech vyspělých zemích je spotřebována pouze jedním typem elektrického motoru – indukčním motorem (Walter, 1999). Tento typ motoru vyžaduje přednostně dodávku třífázové střídavé elektrické energie. Třífázová dodávka může být jednoduše zajištěna pomocí měniče popsaneho v části 4.3.2 a tak se někdy používají s palivovými články. Stručný popis elektrického motoru tohoto typu je uveden v části 4.4.2. V systémech palivových článků jsou používány dva další moderní typy motorů:

bezkartáčový DC motor, jež bude popsán části 4.4.3 a spínaný reluktanční motor (SRM) popsaný v kapitole 4.4.4.

4.4.2 Indukční motor

Indukční motor je velmi rozšířen v průmyslových strojích všech typů. Jeho technologie je velmi vyspělá. Vyžaduje napájení střídavou elektrickou energií, což je může činit na první dojem nepoužitelnými v pro stejnosměrné zdroje, jakým je i palivový článek. Jak jsme však viděli, střídavá energie může být vyráběna pomocí měniče, a ve skutečnosti, měnič potřebný pro výrobu střídavé elektrické energie pro indukční motor není komplikovanější či dražší než zařízení (obvod) potřebný pro řízení bezkartáčového DC motoru či spínaného reluktančního motoru. Takže i tyto široce dostupné a velmi spolehlivé motory, indukční motory, jsou vhodné pro aplikace s palivovými články.

Princip funkce třífázového elektrického indukčního motoru je znázorněn na obrázku 4-17 a 4-18. Tři cívky jsou navinuty podél vnější části motoru, známé jako stator, jak je znázorněno na obrázku 4-17. Rotor se obvykle skládá z měděných či hliníkových tyčí, všechny jsou na konci elektricky spojeny věncem, tvořící jakýsi typ klece, což je též vyobrazeno na obrázku 4-17.



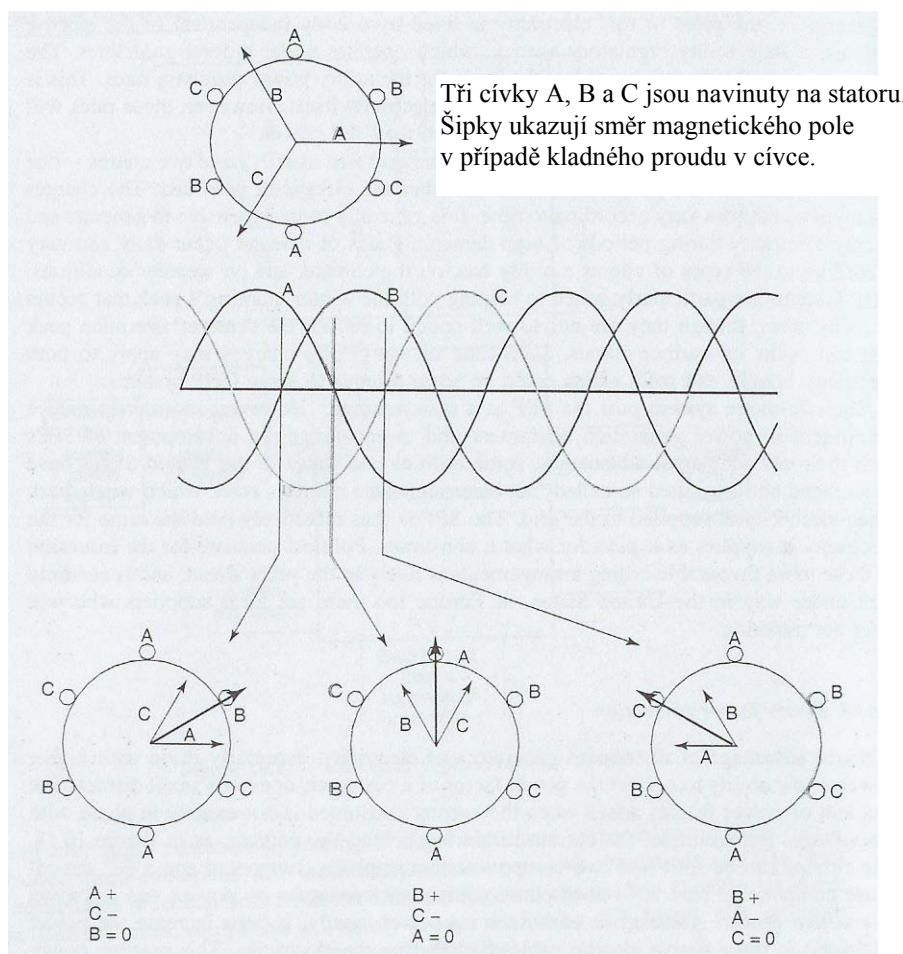
Obrázek 4-17 Znázornění statoru a rotoru indukčního motoru.

Tři vinutí jsou uspořádány takovým způsobem, že kladný proud vyrábí magnetické pole ve směru znázorněném na obrázku 4-18. Jestliže jsou tato tři vinutí napájena třífázovým střídavým proudem dle obrázku 4-18, potom se výsledné magnetické pole otáčí proti směru hodinových ručiček, jak je znázorněno v dolní části tohoto obrázku.

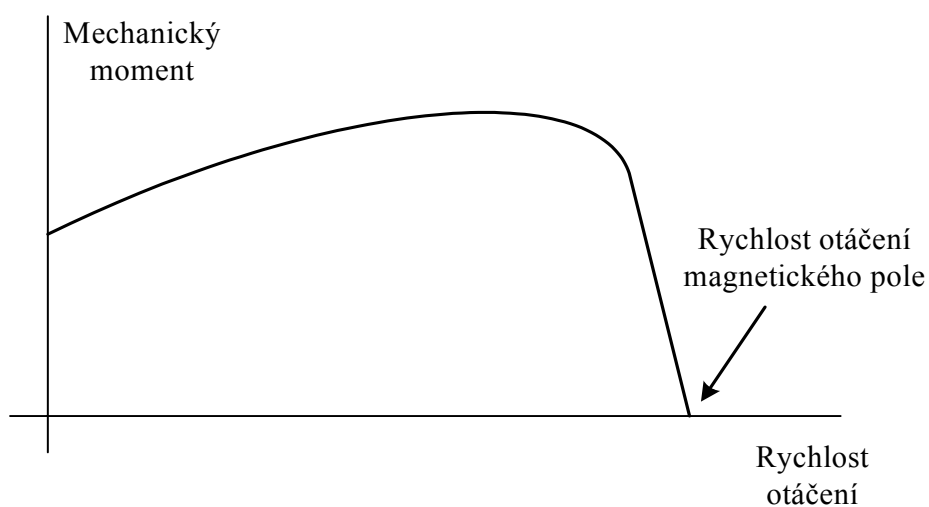
Toto rotující pole prochází skrz elektrické vodiče na rotoru, čímž indukuje elektrické napětí v rotoru a tím i elektrický proud.

Průchodem proudu těmito vodiči vzniká síla způsobující otáčení rotoru. Jestliže se rotor otáčí stejnou rychlostí jako magnetické pole, potom se zde nevyskytuje relativní rychlost mezi otáčejícím se magnetickým polem a vodiči, a tudíž nevzniká proud ve vodičích rotoru a neobjevuje se tedy ani žádný mechanický moment. Výsledkem je graf na obrázku 4-19 znázorňující charakteristický průběh mechanického momentu indukčního motoru na otáčkách

rotoru. Moment narůstá s rostoucím skluzem úhlové rychlosti otáčení rotoru za magnetickým polem, až do optimálního skluzu, za nímž mechanický moment poněkud klesá.



Obrázek 4-18 Znáznornění vzniku rotujícího magnetického pole uvnitř indukčního motoru.



Obrázek 4-19 Typická křivka závislosti mechanického momentu indukčního motoru na otáčkách (momentová charakteristika).

Uspořádání vinutí na obrázcích 4-17 a 4-18 je typické pro dvoupólový stroj. Cívky je možné navinout takovým způsobem, že magnetické pole má čtyři, šest, osm či jakýkoliv jiný sudý počet magnetických pólů. Rychlost otáčení magnetického pole je dána poměrem frekvence napájecího napětí motoru a příslušným počtem pólových dvojic (pólových párů). To nám dává nepříliš vhodný způsob kontroly rychlosti. Mnohem lepším způsobem je kontrola frekvence třífázového napájecího napětí. Při použití obvodu, jež je znázorněn na obrázku 4-16 je to snadné. Frekvence však nedokáže velmi přesně kopírovat rychlost, jestliže je skluz závislý na mechanickém momentu. Nicméně, pokud měříme úhlovou rychlost otáčení, a při včlenění zpětnovazební smyčky, může být frekvence doladěna tak, že dosahuje požadované hodnoty.

Maximální hodnota mechanického momentu závisí na síle magnetického pole v mezeře mezi rotorem a cívkami statoru. To závisí na proudu v cívkách statoru. Problémem je, že pokud frekvence napájecího napětí vzrůstá, proud v cívkách klesá, při uvažování konstantního napětí, poněvadž impedance cívek statoru je přímo úměrná frekvenci. Pokud je tedy měnič napájen ze zdroje konstantního napětí, je maximální mechanický moment nepřímo úměrný rychlosti otáčení magnetického pole statoru. To je případ také systému s palivovými články.

Indukční motory jsou velmi široce používány. Velmi vysoký objem výroby umožňuje vytvářet motory v různých cenových relacích dle účelu použití. Většina výzkumu v této oblasti je zaměřena na vývoj nejlepších možných materiálů.

Indukční motory jsou velmi spolehlivou a rozvinutou technologií. Nicméně skutečnost, že proud musí být v motoru indukován, zvyšuje energetické ztráty tohoto motoru. Výsledkem je menší účinnost indukčních motorů (o 1 až 2 %) oproti motorům, jež budou popsány v následujících částech této kapitoly.

4.4.3 Bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC)

Bezkartáčový stejnosměrný (DC) motor (BLDC motor – Brush-Less Direct Current) je ve skutečnosti střídavý motor. Proud tekoucí motorem je střídavý, jak můžeme vidět na obrázku 4-20. Je však nazýván bezkartáčovým stejnosměrným motorem, poněvadž střídavý proud musí mít proměnlivou frekvenci a tedy odvozenou z dodávky stejnosměrného proudu, a protože jeho charakteristika mechanického momentu v závislosti na rychlosti otáčení rotoru je velmi podobná typické charakteristice stejnosměrného motoru s kartáči. Bezkartáčový stejnosměrný motor není obecně uspokojivý název pro tento typ motoru, proto se můžeme setkat u výrobců a uživatelů s různým pojmenováním tohoto typu motoru. Nejběžnějšími z nich jsou 'samosynchronní střídavý (AC) motor', 'synchronní motor s proměnlivou frekvencí', 'synchronní motor s permanentními magnety' a 'elektronicky komutovaný motor (EMC)'.

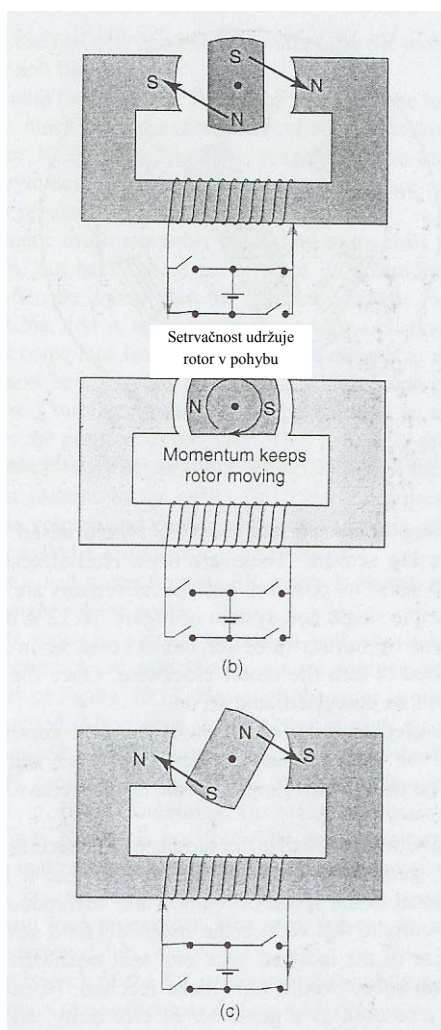
Základní princip funkce BLDC motoru je znázorněn na obrázku 4-20. Spínače směrují proud ze zdroje stejnosměrného napětí přes cívku statoru. Rotor je tvořen permanentním magnetem. Na obrázku 4-20a protéká proud ve směru magnetizujícím stator tak, že rotor se otáčí ve směru hodinových ručiček. Na obrázku 4-20b prochází rotor mezi póly statoru a proud statoru je vypnutý. Setrvačnost udržuje rotor v pohybu. Na obrázku 4-20c je znázorněno přepólování cívek statoru, čímž došlo k obrácení směru toku proudu a orientace magnetického pole statoru.

Rotor je tedy tažen dále ve směru hodinových ručiček. Proces pokračuje při střídavém proudu v cívce statoru.

Jak je zřejmé z popisu principu funkce tohoto typu motoru, spínání proudu musí být sesynchronizováno s polohou rotoru. To je dáno prostřednictvím snímačů. Těmito snímači jsou často Hallovy sondy, jež využívají magnetismus rotoru ke zjištění jeho polohy. Velmi často jsou použity také optické snímače polohy.

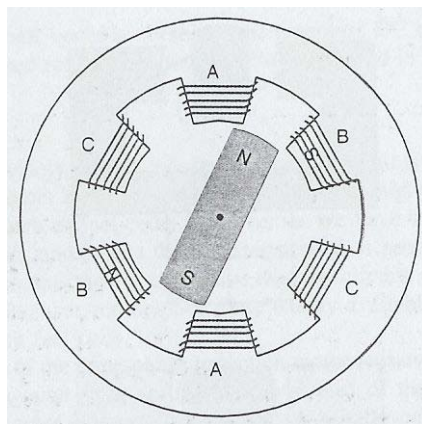
Problém systému s jednou jednoduchou cívkou na obrázku 4-20 spočívá v tom, že mechanický moment je velmi nestabilní. To je zdokonaleno použitím tří či více cívek, jak je znázorněno na obrázku 4-21. Na tomto obrázku je cívka B napájena za účelem posunutí rotoru ve směru hodinových ručiček. V okamžiku, kdy je rotor mezi cívkami B, spínače přepnou napájení na cívku C a tak dále.

Elektronický obvod použitý na řízení a kontrolování cívkových proudů je obvykle nazýván střídač. Obvykle je stejný či velmi podobný našemu univerzálnímu obvodu střídače uvedenému na obrázku 4-16. Hlavním ovládacím vstupem procesoru bude signál ze snímače polohy rotoru.



Obrázek 4-20 Znázornění principu funkce bezkartáčového stejnosměrného motoru.

Znakem těchto BLDC motorů je snižování mechanického momentu se vzrůstající rychlostí otáčení. Rotující magnet vytváří v cívce zpětné elektromotorické napětí v závislosti na jeho přibližování se k cívce. Toto zpětné elektromotorické napětí je úměrné rychlosti otáčení a snižuje proud procházející cívkou. Snižující se proud snižuje sílu magnetického pole a tedy mechanický moment. Případně, velikost indukovaného zpětného elektromotorického napětí bude úměrná napájecímu napětí v okamžiku, kdy bude dosažena maximální rychlost otáčení rotoru.



Obrázek 4-21 Znárodnění uspořádání tří cívek na statoru BLDC motoru.

Všimněme si, že tento motor může být též velmi jednoduše použit jako generátor elektrické energie, a také pro regenerační (rekuperační) a dynamické brzdění.

Pro rotor BLDC motoru je vyžadován silný permanentní magnet, což zvyšuje pořizovací cenu těchto motorů. Oproti indukčním motorům je jejich výraznou výhodou nepotřebnost indukování proudů v motoru, což je činí poněkud účinnějšími a přisuzuje jim poněkud vyšší měrný výkon. Požadavky na řídicí elektroniku jsou obdobné těm pro indukční motor.

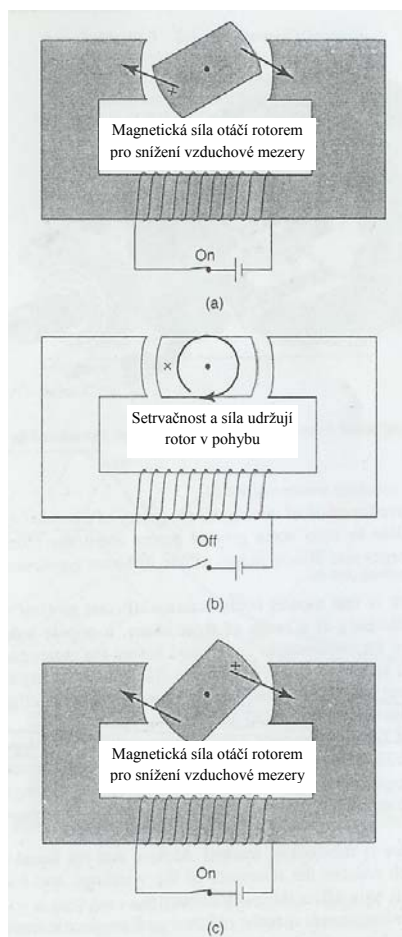
4.4.4 Spínané reluktanční motory (SRM)

Základní princip funkce tohoto typu motoru je znázorněn na obrázku 4-22. Na obrázku 4-22a je stator i rotor motoru magnetizován proudem tekoucím cívkou statoru. Protože se rotor nenachází v ose magnetického pole statoru, vznikající magnetický moment usiluje o minimalizaci vzduchové mezery a o vytvoření symetrického magnetického pole. Magnetické pole se “zdráhá” překonat vzduchovou mezerou a usiluje o její minimalizaci (o minimalizaci magnetického odporu, tedy reluktance). To je důvod, proč tento motor nazýváme reluktanční motor.

Na obrázku 4-22b je rotor v přímce se státorem; proud statoru je vypnut. Setrvačnost však otáčí rotorem dále přes jednu čtvrtinu otáčky do polohy, jež je znázorněna na obrázku 4-22c. Zde je opět použito magnetické pole, a to opět ve stejném směru. Magnetické pole využívá mechanického momentu ke zmenšení vzduchové mezery a k symetrizaci pole, což uvádí rotor v otáčivý pohyb.

V SR motorech je rotor vyroben z magneticky měkkého železa. Také není zapotřebí, aby proud v cívce statoru byl střídavý. Z toho nezbytně vyplývá, že také tento typ motoru je velmi

jednoduchý a nízkou pořizovací cenou. Rychlost otáčení rotoru může být řízena prostřednictvím délky doby, při které prochází proud cívkou při každém výkonovém pulzu. Poněvadž rotor není z permanentního magnetu nedochází k tvorbě elektromagnetického napětí, jak tomu bylo u BLDC motorů, což nám umožňují dosahovat vyšších rychlostí. Ve spojitosti s palivovými články činí tyto vlastnosti SR motory obzvláště vhodné pro radiální kompresory a ventilátory.



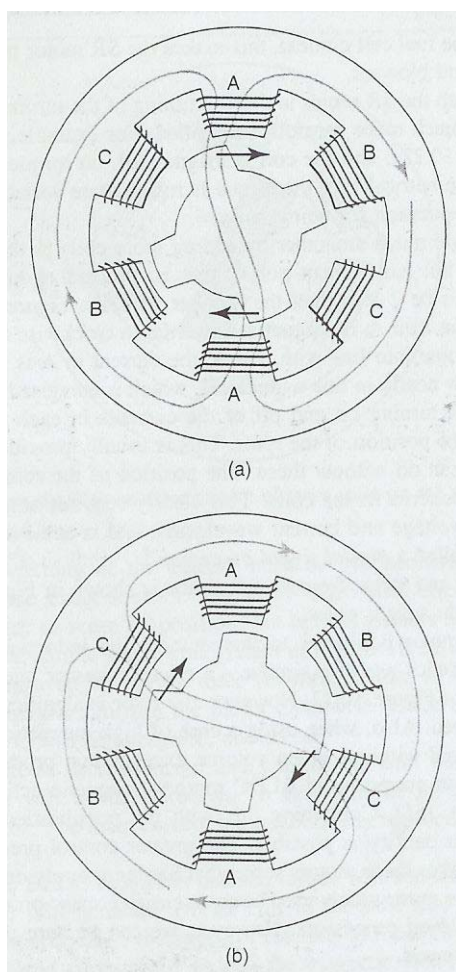
Obrázek 4-22 Znázornění základního principu funkce spínaného reluktančního motoru.

Hlavním úskalím SR motorů je časování zapínání a vypínání statorového proudu, jež musí být daleko pečlivěji řízeno. Například, jestliže je rotor posunut vůči statoru o 90° a cívka je magnetizovaná, nevzniká mechanický moment a pole je symetrické. Takže mechanický moment je mnohem více proměnlivý.

Mechanický moment může být vyhlazen přidáním více vinutí na stator. Rotor je opět z plechů s vyniklými póly. Počet vyniklých pólů je často o dva nižší než je počet cívek statoru. Tento princip je znázorněn na obrázku 4-23.

Na obrázku 4-23a působí magnetizovaná cívka A prostřednictvím síly ve směru hodinových ručiček na rotor. V okamžiku, kdy vniklý pól rotoru dorazí do osy s cívkou A, proud cívkou A je vypnut. Dva další póly se nyní nachází v blízkosti cívky C. V tomto okamžiku začne cívka C procházet proud, což udržuje rotor v jeho rovnoměrném otáčení. Správné zapnutí a vypnutí proudu v každé cívkě vyžaduje dobrou informaci o poloze rotoru. Ta je obvykle poskytována snímači. Moderní ovládací systémy jsou toho schopny také bez snímačů. Poloha

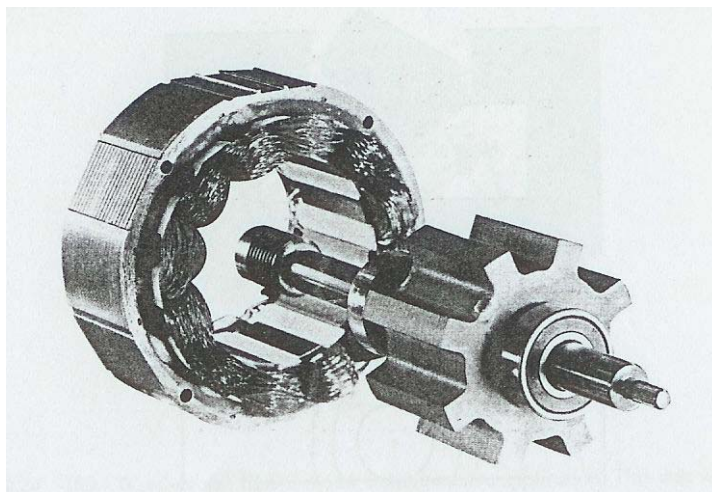
rotoru je odvozena ze vztahu napětí a proudu v cívkách. To samozřejmě vyžaduje velmi rychlou a komplexní analýzu křivek proudu a napětí, jež je zajišťována prostřednictvím mikroprocesoru.



Obrázek 4-23 Znázornění funkce čtyřpólového SR motoru s vyniklými póly.

Příklad SR motoru je znázorněn na obrázku 4-24. V tomto případě má rotor osm vyniklých pólů. Stator je obdobný statoru indukčních motorů a BLDC motorů. Řídící elektronika je také obdobná – mikroprocesor, elektronické spínače, stejný princip jako na obrázku 4-16. Rotor je výrazně jednodušší, a tedy levnější. Pokud použijeme jádro s vysokou magnetickou permeabilitou, mechanický moment, jež může vznikat uvnitř poskytnutého objemu, přesahuje hodnotu toho, který vzniká v indukčním motoru (magnetizace v důsledku proudu) a v BLDC motoru (magnetické působení permanentních magnetů). V kombinaci s možností vyšší rychlosti to znamená, že je k dispozici vyšší výkonová hustota.

Ačkoliv je maximální účinnost SR motoru poněkud nižší než účinnost BLDC motoru, SR motory udržují svoji účinnost přibližně konstantní přes celý rozsah rychlosti otáčení rotoru a mechanického momentu, než jakýkoliv jiný typ motoru.



Obrázek 4-24 Rotor a stator SR motoru.

4.5 Hybridní systém palivový článek/baterie či palivový článek/kondenzátor

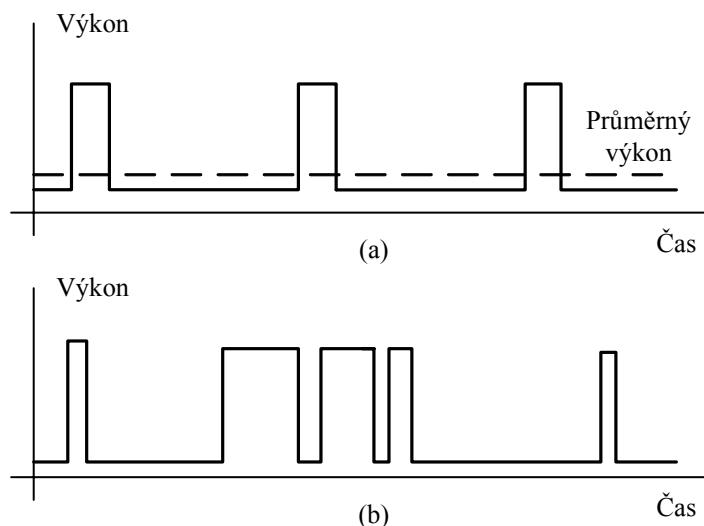
Využití baterií ve spojení s palivovými články může snížit náklady výkonového systému založeného na palivovém článku. Typickým příkladem je napájení jistého typu elektronického zařízení.

Podstata hybridního systému s palivovým článkem je založena na práci palivového článku téměř vždy v blízkosti maximálního výkonu. Pokud je požadovaný výkon ze systému nízký, potom je nadbytek elektrické energie uskladněn v baterii či kondenzátoru (Výhodou kondenzátoru je účinnější a rychlejší cyklus nabíjení/vybíjení. Nevýhodou je, že uskladní mnohem méně energie na poskytnutý prostor a je mnohem dražší na jednu uskladněnou watthodinu.) Pokud přesáhne požadovaný výkon zásobovaného zařízení hodnotu, jež může být poskytována samotným palivovým článkem, potom je energie odebírána z baterie či kondenzátoru.

Nejjednodušší hybridní systémy z hlediska návrhu jsou ty, u kterých jsou požadavky na výkon vysoce proměnlivé a také předvídatelné. Takováto situace je znázorněna na obrázku 4-25a. Jedná se o zařízení pro zaznamenávání dat, pro přenos dat, telekomunikační zařízení, či zařízení pro navigaci na zemi či pomocí bóje. Zařízení je po dlouhou dobu ve stavu klidu a palivový článek dobíjí baterii. Během doby přenosu, baterie dodává většinu požadovaného výkonu. Palivový článek pracuje více či méně plynule s průměrným výkonem a tudíž je jeho návrh jednoduchý. Požadavky na baterii jsou taktéž jasné, musí poskytovat dostatečný výkon a udržet dostatečné množství energie pro jeden vysoce-výkonový pulz a musí být schopná dobít v období mezi těmito pulzy.

V mnoha dalších případech není požadovaný výkon pouze vysoce proměnlivý, ale také nepředvídatelný. Takovým případem je mobilní telefon, pro který je časový průběh odebíraného výkonu znázorněn na obrázku 4-25b. Vysoce-výkonové pulzy mohou být více frekventované a mohou také trvat delší dobu, či naopak mohou trvat krátce s malou frekvencí výskytu. I pro tento případ by bylo dobré mít palivový článek provozovaný s konstantním průměrným výkonem, avšak potřebná baterie musí být podstatně větší, neboť by měla poskytnout několik vysoce-

výkonových pulzů bez jakéhokoliv času na dobití mezi jednotlivými pulzy. Výhodou však může být též nárůst výkonu palivového článku nad jeho dlouhodobý průměrný výkon, díky čemuž se baterie dobíjí rychleji.



Obrázek 4-25 Časový průběh výkonu pro dva odlišné systémy napájené hybridním zdrojem energie - palivový článek/baterie.

V některých případech jsou již modely pro návrh takových hybridních systémů připraveny, neboť již byly vyvinuty pro hybridní systémy sluneční panel/baterie. Pro srovnání, model potřebný pro systém založený na palivovém článku je mnohem jednodušší, neboť v případě slunečního panelu je jak spotřeba tak i výroba elektrické energie náhodně i předvídatelně proměnná. V případě hybridních systémů s palivovými články může být výroba elektrické energie spolehlivě a docela přesně namodelována.

5 TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ, ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ A POPIS ZÁKLADNÍCH FUNKČNÍCH PRINCIPŮ, PROVOZNÍ TEPLOTA

5.1 Kritéria dělení palivových článků

Základní rozdělení dosud známých technologií palivových článků je provedeno na základě použitého elektrolytu, viz. tabulka 5-1.

Tabulka 5-1 Typy palivových článků, základní rozdělení a jejich parametry

ANGLICKÝ NÁZEV	ZNAČENÍ	ČESKÝ NÁZEV	ELEKTROLYT	PROVOZNÍ TEPLOTA	ÚČINNOST ELEKTR. [%]
Alkaline Elektrolyte Fuel Cell	AFC	Alkalické palivové články	hydroxid draselný KOH (30%)	80 °C	60 ÷ 70
Proton Exchange Membrane Fuel Cell	PEFC	Pal. články s tuhými polymery	Membrána s iontovou vodivostí	80 °C	50 ÷ 68
Direct Metanol Fuel Cell	DMFC	Pal. články přímé metanolové	Membrána s iontovou vodivostí	80 ÷ 130 °C	20 ÷ 30
Phosphoric Acid Fuel Cell	PAFC	Paliv. články s kyselinou fosforečnou	H ₃ PO ₄	200 °C	55
Molten Carbonate Fuel Cell	MCFC	Paliv. články s roztavenými uhličitany	Tavené karbonáty lithia, sodíku, draslíku	650 °C	65
Solid Oxid Fuel Cell	SOFC	Paliv. články s tuhými oxidy	Stabilizovaný zirkonoxid (ZrO ₂ /Y ₂ O ₃)	800 ÷ 1 000 °C	60 ÷ 65

Druhým významným kritériem pro rozdělení palivových článků je jejich pracovní teplota. Palivové články se na základě tohoto kritéria dělí na články nízkoteplotní a vysokoteplotní. Do skupiny nízkoteplotních palivových článků patří AFC, PEMFC, DMFC (v některých případech také PAFC), do vysokoteplotních potom systémy MCFC a SOFC.

Někdy se používá také označení středněteplotní palivové články. Do této skupiny spadá technologie PAFC.

Vymezení provozních teplot pro jednotlivé skupiny palivových článků:

Nízkoteplotní 60 ÷ 160 °C

Středněteplotní 160 ÷ 220 °C

Vysokoteplotní 600 ÷ 1 100 °C

Na obrázku 5-1 jsou znázorněny pracovní teploty a ionty, zprostředkující iontovou vodivost v elektrolytu, pro jednotlivé typy palivových článků. Každá z technologií palivových článků má svá specifika, konstrukční a technologická omezení a výhody, které jí předurčují ke konkrétnímu způsobu použití v stacionárních aplikacích. Na obrázku 5-2 je znázorněno použití jednotlivých systémů využívající dnes dostupné a vyvíjené jednotky, a to v závislosti na optimálním tepelném a elektrickém výkonu dané technologie.

AFC	$\xrightarrow{\text{H}_2}$ $\xleftarrow{\text{H}_2\text{O}}$	$\xleftarrow{\text{OH}^-}$	$\xleftarrow{\text{O}_2}$	60°C
PEFC	$\xrightarrow{\text{H}_2}$	$\xrightarrow{\text{H}^+}$	$\xleftarrow{\text{O}_2}$ $\xleftarrow{\text{H}_2\text{O}}$	80°C
PAFC	$\xrightarrow{\text{H}_2}$	$\xrightarrow{\text{H}^+}$	$\xleftarrow{\text{O}_2}$ $\xleftarrow{\text{H}_2\text{O}}$	200°C
MCFC	$\xrightarrow{\text{H}_2}$ $\xleftarrow{\text{CO}_2}$ $\xleftarrow{\text{H}_2\text{O}}$	$\xleftarrow{\text{CO}_3^{2-}}$	$\xleftarrow{\text{O}_2}$ $\xleftarrow{\text{CO}_2}$	650°C
SOFC	$\xrightarrow{\text{H}_2}$ $\xleftarrow{\text{H}_2\text{O}}$	$\xleftarrow{\text{O}^{2-}}$	$\xleftarrow{\text{O}_2}$	1000°C

Obrázek 5-1 Typ palivového článku, využívaný iont, pracovní teplota.

	Vysokoteplotní SOFC	MCFC	PAFC	Nízkoteplotní PEMFC
Kogenerační jednotky pro obytné budovy P_{el} 1÷5 kW P_{th} 3÷15 kW				
Decentralizov. výroba tepla a el. en. P_{el} 100÷200 kW P_{th} 100÷200 kW				
Decentralizov. výroba el. en. P_{el} 500÷1000 kW P_{th} 200÷400 kW				

Obrázek 5-2 Stacionární aplikace palivových článků, jednotlivé typy a jejich výkonové zařazení ve stacionárních aplikacích.

5.2 Stručný popis jednotlivých typů palivových článků

5.2.1 Alkalické palivové články (AFC – Alkaline Electrolyte Fuel Cells)

Alkalické palivové články jsou vyvíjeny od padesátých let dvacátého století, obzvlášť v USA a Evropě. V rámci vývoje těchto článků byla dosažena vysoká úroveň znalostí této technologie, technického řešení a samotné konstrukce. Tato technologie používá jako elektrolytu alkalický roztok, a to především hydroxid draselný (KOH). Převážně se udává 30%-ní vodný roztok, je však možné vysledovat konstrukce palivových článků s koncentracemi KOH od 3 do 50% hmot. Dalším možným elektrolytem pak může být hydroxid sodný (NaOH), ten je však méně rozpustný oproti hydroxidu draselnému, proto je jeho použití spíše výjimkou.

Provozní teplota palivových článků typu AFC je obvykle 60 °C. Rozsah provozních teplot je uváděn v rozsahu 20 ÷ 90 °C.

Reakce probíhající v palivovém článku typu AFC můžeme popsat následovně:

- reakce probíhající na anodě:



- reakce probíhající na katodě:



Alkalické palivové články dosahují nejvyšší účinnost ze všech dosud známých typů palivových článků. Toto tvrzení můžeme odůvodnit především rychlostí redukce kyslíku v alkalickém elektrolytu, která je vyšší než v kyselých mediích.

Pro provoz tohoto typu článku je zapotřebí čistého vodíku a kyslíku, neboť elektrolyt, hydroxid draselný KOH, reaguje s oxidem uhličitým, který je obsažen i ve vzduchu na uhličitán draselný. Ten potom účinně blokuje elektrody ucpáváním jejich pórů.



Dalším efektem je pokles koncentrace iontů OH^- , které jsou nahrazovány CO_3^{2-} .

Tato vysoká citlivost na oxid uhličitý je limitující pro použití jen pro aplikace s vysoce čistými reagujícími plyny.

Nejznámější je použití těchto palivových článků v programu NASA Apollo, a dále jako zdroj elektrické energie u Space Shuttle.

Alkalické palivové články lze rozdělit na dva základní typy, a to na palivové články s cirkulujícím elektrolytem a palivové články se statickým elektrolytem.

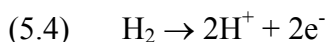
S ohledem na výše zmíněnou citlivost na CO_2 je převládajícím typem alkalických palivových článků systém s oběhovým systémem elektrolytu. Ten slouží k regeneraci, nahrazování elektrolytu, odstraňování produktů reakce, tj. vody, jež by jinak způsobila rozředění elektrolytu. Tento systém také zabezpečuje i odvod tepla z palivového článku.

5.2.2 Membránové palivové články (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cells)

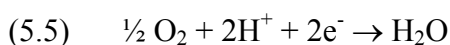
Oproti alkalickému palivovému článku je elektrolyt u PEMFC článku ve formě membrány, která je ve své podstatě fólií schopnou vést ionty (protony). Membrána tedy plní funkci elektrolytu a současně nosiče katalyzátoru, který je v tenkých vrstvách nanesen přímo na fólii. Membrána rovněž zaručuje fyzické oddělení přiváděných reakčních plynů.

Reakce probíhající v palivovém článku typu PEMFC:

- reakce probíhající na anodě:



- reakce probíhající na katodě:



U tohoto typu palivových článků se téměř výlučně využívá možnost modulové konstrukce. Moduly, skládající se z anody, katody a vlastní PEM fólie, jsou řazeny do tzv. stacků, což je, jednoduše řečeno, sendvičové uspořádání. Jednotlivé moduly jsou fyzicky odděleny tzv. bipolárními deskami, které plní funkci jednak již zmíněného fyzického oddělení jednotlivých modulů, neboť jsou v nich umístěny kanálky pro rozvod reakčních plynů, a dále vlastního elektrického propojení katody s anodou v sériovém zapojení. Bipolární deska tedy musí být dobrým elektrickým vodičem a současně dobře obrobitelná, abychom byli schopni vytvořit kanálky pro rozvod reakčních plynů.

Pracovní teplota již běžně vyráběných palivových článků je v rozmezí teplot 60 až 80°C. Velkou výhodou palivových článků typu PEMFC je jejich dynamika, a tedy i velice rychlý start ze studeného stavu. To je také jedním ze základních předpokladů pro použití těchto článků především v mobilních aplikacích.

PEMFC články pracují s čistým vodíkem, jakožto palivem na straně anody, a s kyslíkem či vzduchem, jakožto okysličovadlem na straně katody. Díky malé tloušťce elektrolytu (tloušťka fólie se obvykle pohybuje v rozmezí 50 až 150 μm) se měrný odpor palivového článku pohybuje v nízkých hodnotách (obvykle $10^{-2} \div 1 \cdot 10^{-3} \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, díky čemuž je dosahována vysoká hodnota proudové hustoty).

Palivové články typu PEM používají katalyzátor na bázi platiny. Z toho důvodu je pro palivové články tohoto typu velice nebezpečným plynem oxid uhelnatý CO. Oxid uhelnatý je silným jedem pro platinový katalyzátor, neboť při jeho styku s tímto katalyzátorem dochází k jeho absorbování platinou a ta se pak stává povrchově neaktivní. Systémy na bázi palivových článků typu PEM využívající plynů z reformátoru musí být vybaveny náročnými systémy čištění plynů. Přípustná koncentrace CO je uváděna cca 20 ppm (obvykle do 10 ppm). Použitím modifikovaných katalyzátorů je možno toleranci na CO výrazně zvýšit, jako příměs k platině je používáno např. Rutenium (Ru). I přesto oxid uhelnatý představuje pro tento typ článku stávajících technologií „smrtné“ nebezpečí.

Rozšíření palivových článků typu PEM se jeví jako nejperspektivnější v mobilních aplikacích, a to jak v automobilovém průmyslu tak i v aplikacích přenosných elektrických zařízení (notebooky, mobilní telefony, pracovních nářadí – svítilny, a další). Samozřejmě je možná jejich aplikovatelnost i v oblasti energetických zdrojů.

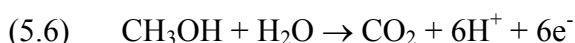
(Velice problematická je u mobilních aplikací přeprava a skladování vodíku, jakožto reakčního plynu. Tyto problémy jsou v dnešní době již technicky zvládnutelné, avšak nakládání s vodíkem a hmotnost celého systému palivového článku, včetně přidružených hospodářství, jsou prozatím činitelé, kteří hrají významnou roli při rozhodování o aplikování této technologie.)

5.2.3 Přímé metanolové palivové články (DMFC – Direct Methanol Fuel Cells)

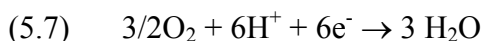
Metanol je považován za palivo s velikou budoucností v oboru mobilních aplikací palivových článků. Jednou z největších výhod metanolu oproti vodíku využívanému v aplikacích palivových článků je mnohem jednodušší, prostorově a hmotnostně méně náročné skladování a transport. V membránových palivových člancích s přímým zpracováním metanolu dochází k přímé elektrochemické oxidaci, bez mezistupně, ke kterému by byl nutný reforming.

Reakce probíhající v palivovém článku typu DMFC:

- reakce probíhající na anodě:



- reakce probíhající na katodě:



Konstrukce palivového článku je obdobná jako u klasického palivového článku typu PEM. Na anodu je však přiváděn přímo metanol. Na katodu je přiváděn čistý kyslík či vzduch. Reverzibilní napětí palivového článku při oxidaci metanolu je 1,215 V, zatímco u vodíkového dosahuje hodnoty 1,23 V.

Vlastní vývoj přímých metanolových článků je v současnosti doprovázen ještě mnoha problémy, které je nutné řešit. Metanol samotný představuje problém i pro současné speciální membrány, jelikož díky difúzním procesům a elektroosmóze může procházet membránou ze strany anody ke katodě. Dalším problémem je aktivita katalyzátoru na anodě, která není u současných konstrukcí zcela vyhovující. Kromě toho dochází ke snižování katalytické aktivity katody díky tvorbě tzv. smíšeného potenciálu.

Po dosažení požadovaného katalytického efektu na elektrodách a vývoji odpovídající vylepšené membrány se před tímto typem palivových článků otevírají velké možnosti. Je používán uhlovodík, jehož skladovatelnost je ve srovnání s vodíkem mnohokrát výhodnější. Jeho výhodou ve srovnání s použitím PEMFC pro příslušný uhlovodík je také absence dalšího zařízení (reformeru), díky čemuž je hmotnost palivového článku typu DMFC nižší. To je výhoda především u mobilních jednotek. Dále je nutno počítat s tím, že reformer musí pracovat při určité teplotě, což přináší další problémy se startem reformační jednotky a vlastním provozem systému.

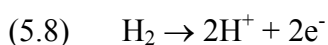
Tento typ palivových článků stále poskytuje velký potenciál jak ve vývoji a zdokonalování tak i v budoucích aplikacích, a to jak stacionárních tak i, a to převážně, v aplikacích mobilních (notebooky, kapesní počítače, mobilní telefony, automobilový průmysl a další).

5.2.4 Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cells)

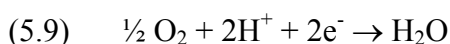
Použití kyseliny jakožto elektrolytu v palivovém článku, v případě PAFC se jedná o H_3PO_4 , umožňuje použití reakčních plynů obsahujících oxid uhličitý CO_2 , oproti AFC, u kterých byl výskyt oxidu uhličitého doprovázen problémy, viz. část 5.2.1.

Reakce na článku potom odpovídají reakcím vyskytujícím se u palivového článku typu PEMFC.

- reakce probíhající na anodě:



- reakce probíhající na katodě:



Při provozu palivového článku tohoto typu na metanol či na zemní plyn (stacionární aplikace) je nezbytně nutné včlenit do systému reformer, a také čištění plynu za reformerem, především od CO . Součástí systému je i výměník tepla. Článek PAFC z důvodu své pracovní teploty cca 200°C má oproti PEMFC výrazně vyšší toleranci k CO (rovnováha je posunuta k desorpci). Požadovaná čistota plynů, co se týče koncentrace oxidu uhelnatého, bývá pod koncentrací 1 mol %. Z tohoto dále plyne, že je možno palivový článek zařadit za shiftkonvertor zařazený za reformerem (tyto termíny budou vysvětleny v kapitole č. 6).

Elektrolytem je tedy kyselina fosforečná. Elektrody se ve většině známých konstrukcí skládají z látky na bázi uhlíkových vláken, na které je nanesen platinový katalyzátor. Tento nanodisperzní katalyzátor je nanesen na nosiči (saze). Kyselina fosforečná je ve formě gelu nanesená na pevné matrici. Bipolární desky bývají provedeny z grafitu. Při výběru konstrukčních materiálů je samozřejmě nutno brát v potaz agresivitu pracovního prostředí.

Palivové články tohoto typu již dosahují v komerčních aplikacích výkonů řádu $200 \text{ kW}_{\text{el}}$.

5.2.5 Palivové články s tavenými karbonáty (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cells)

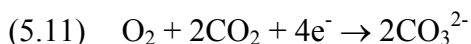
Tyto palivové články se již díky své pracovní teplotě, cca 650°C , zařazují do skupiny vysokoteplotních palivových článků. Pro tento typ palivového článku je palivem vodík a oxid uhelnatý.

Reakce pro oxid uhelnatý:

- reakce probíhající na anodě:

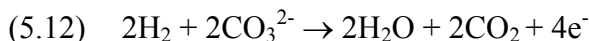


- reakce probíhající na katodě:



Reakce pro vodík:

- reakce probíhající na anodě:



- reakce probíhající na katodě:



Je tedy vhodný pro uhlovodíkové plyny, kterými mohou být zemní plyn, plyny ze zplyňování uhlí, biomasy, apod. Před vstupem těchto plynů do samotného palivového článku musí projít procesem reformingu. Pro provoz článku je nutná recirkulace části vzniklého oxidu uhličitého z anody na katodu, viz. průběh reakcí na článku.

Elektrolytem je směs roztavených uhličitů lithia a draslíku (Li_2CO_3 , K_2CO_3) nanesená na LiAlO_2 matrici. Materiálem elektrod je nikl. Tento typ palivových článků již nepotřebuje drahé kovy jakožto katalyzátory. Je to dáno vysokou provozní teplotou palivového článku, s čímž souvisí i vysoká teplota a samovolný průběh reakce.

Problémy při provozu článku jsou spojeny především s vysoce korozivním prostředím a s oxidací niklu na katodě při nájždění článku. Katalyzátorovým jedem je tady síra a to ve všech formách.

5.2.6 SOFC - Palivové články s pevnými oxidy

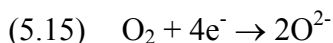
Podrobný popis technologie palivových článků typu SOFC je uveden v kapitole č.6.

Reakce pro oxid uhelnatý jakožto palivo:

- reakce probíhající na anodě:

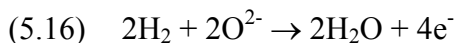


- reakce probíhající na katodě:

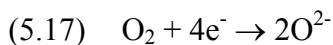


Reakce pro vodík jakožto palivo:

- reakce probíhající na anodě:



- reakce probíhající na anodě:



5.3 Zhodnocení parametrů jednotlivých palivových článků

Z výše stručně popsaných chemických principů, konstrukčních a funkčních materiálů daných technologií je zřejmé, že specifičnost daných technologií je i v možném použití palivových plynů. Především je nutno brát ohled na zmíněné součásti palivových článků, především se to týká katalyzátorů a elektrolytů na tolerance příměsí plynů, které mohou být pro daný druh článku jedem, jež může vézt k nevratnému poškození palivového článku. Tolerance jednotlivých technologií na nežádoucí složky jsou uvedeny v tabulce 5-2.

Tabulka 5-2 Reakční plyny palivových článků, tolerance nežádoucích složek plynu

Plyn \ Paliv. článek	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	palivo	palivo	palivo	palivo	palivo
CO	< 10 ppm	0	< 2 %	palivo	palivo
CO ₂	tolerance	0	tolerance	tolerance	tolerance
N ₂	tolerance		<2%	tolerance	tolerance
Cl	< 0,05 ppm		< 1 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm
S (jako H ₂ S a CS)	0 (Probíhá výzkum)		< 50 ppm	< 0,5 ppm	< 1 ppm
Tuhé částice	0	0	< 1mg/m ³	0	< 1mg/m ³

6 PALIVOVÉ ČLÁNKY S PEVNÝMI OXIDY (SOFC – SOLID OXIDE FUEL CELLS)

6.1 Základní popis palivových článků s pevnými oxidy

Palivové články tohoto typu patří do skupiny vysokoteplotních palivových článků. Jejich pracovní teplota se pohybuje v intervalu 800 až 1 100°C. Pro tento typ článků je palivem vodík a oxid uhelnatý. Palivový článek typu SOFC je tedy vhodný stejně jako MCFC pro uhlovodíkové plyny(, počítaje samozřejmě s parním reformováním plynů nebo jinou příbuznou metodou.) Elektrody jsou vyráběny na bázi niklu, a tudíž platí, že síra a její sloučeniny působí, stejně jako je tomu u palivových článků typu MCFC, jako katalyzátorový jed.

Elektrolytem je keramika tvořena oxidem zirkoničitým ZrO_2 , který je stabilizovaný oxidem yttria Y_2O_3 . Tato hmota vykazuje při teplotách nad 750°C dobrou vodivost O^{2-} iontů při zanedbatelné elektronové vodivosti.

Z teoretických předpokladů vychází systém SOFC, oproti MCFC, jako méně výhodný. Hlediskem je zde vyšší pracovní teplota, kterou je nutno respektovat v průběhu vlastního provozu článku, ale také při jeho najíždění a odstávce. Při předpokládané pracovní teplotě 650°C u MCFC a 1000°C u SOFC je i úměrně menší slučovací Gibbsova volná energie. Mezi oběma systémy, při daných teplotách, je pak rozdíl v teoretickém svorkovém napětí přibližně 100 mV. V praxi je však tento rozdíl značně menší. Je to dáno menší rezistencí zirkoniového elektrolytu a to především proto, že jsou dosahovány malé tloušťky jeho vrstvy. Výsledkem je proudová hustota až $1000 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. Problémy s elektrolytem u MCFC dále vyvstávají, budeme-li analyzovat jeho chemickou reaktivnost, chemické složení a jeho následný vliv na jiné součásti článku. Chemická degradace MCFC článku, nutnost použití speciálních materiálů a otázka celkové životnosti palivového článku, dávají pro použití a vlastní vývoj a výzkum SOFC článků mnohem více „kladných“ argumentů.

Jedním ze zásadních problémů při provozu a najíždění SOFC palivových článků je otázka tepelné roztažnosti jednotlivých komponent článku. Tato musí být řešena jak s ohledem na teplotní pnutí, tak i těsnost součástí systému. Tímto je v současnosti podmíněn i vývoj koncepcí konstrukčního uspořádání článku SOFC, viz dále uvedené příklady konstrukcí vyvíjených jednotlivými výrobci.

Během provozu SOFC článků v bateriích a velkých soustavách, dochází k časovým a místním rozdílům teplot, složení a tlaku plynů. Teplotní rozdíly mezi vstupem a výstupem plynů dosahují běžně hodnot okolo 100°C. V případě vnitřního, endotermního reformování metanu jsou místní teplotní rozdíly daleko vyšší. Teplotní gradienty vyvolávají mechanická napětí, nerovnoměrnosti elektrochemických dějů a proudových hustot uvnitř palivových článků. Keramické materiály článků špatně snášejí velké a opakované změny teplot při současné mechanické zátěži, což může vyvolat i jejich praskání. Těsnění jednotlivých modulů při měnících se vysokých teplotách je taktéž technicky i materiálově náročné. Jako těsnící hmoty se používají plsti a tkaniny z keramických vláken, speciální keramické tmely a skla, nebo kombinace plstí se speciálními keramickými tmely. Dlouhodobě spolehlivá uspořádání a

materiálová řešení SOFC článků do baterií a bloků, vhodné tvary a materiály spojovacích a bipolárních členů, vhodné vnitřní rozdělovače plynů pro zmenšení lokálních tepelných nerovnoměrností a vlastní materiály těsnění jsou stále středem výzkumu a střetným know-how vývojových pracovišť a firem. Obecně jsou známy několikero konstrukce, jež jsou dále v této publikaci zmíněny. Nově vyvíjené konstrukce a materiály, z důvodu ochrany know-how, však nebývají většinou otevřeně prezentovány.

Snížování provozní teploty SOFC článků kvůli menšímu namáhání, možnosti použití levnějších materiálů a lepšímu utěsňování soustav článků má smysl z hlediska tepelné integrace asi do 600°C. Při nižších teplotách již klesá využitelnost odpadního tepla v parních a kombinovaných cyklech.

Uspořádání palivových článků typu SOFC je možné kombinovat nejen s využitím tepla, případně i tlaku produkovaných plynů v turbínách, ale po odstranění CO v produkovaných plynech z článků SOFC a po snížení teploty také s nízkoteplotními palivovými články. Články typu SOFC vyžadují také čistší paliva s velmi nízkým obsahem síry. Přítomnost oxidu uhličitého v katodovém prostoru nevádí, protože CO₂ se chová jako inertní plyn. Produkce oxidů dusíku palivovými články typu SOFC je velmi nízká.

Jiné, samostatné typy problémů (popsané v další kapitole) přináší využitelnost plyných a kapalných paliv a vnitřní katalytická reformace uhlovodíků v anodové oblasti. Zde hrozí při špatně tepelně řízeném procesu (nerovnoměrné teploty) a nevhodném palivu, případně při nevhodném ředění paliva, vznik sazí, případně deaktivace až zničení katalyzátoru i anody. SOFC palivové články jsou velice citlivé na obsah sirných sloučenin, prachu, sazí, dehtů, par těžkých a alkalických kovů v přiváděném palivu. Není tak možný jejich dlouhodobý spolehlivý provoz bez čištění přiváděných plynů.

Nedílnou součástí kompaktního provedení systému SOFC se dále stává parní reforming, čištění plynu (především odsíření plynu) a také systém spalování nezreagovaných plynů a využití odpadního tepla spalin z palivového článku.

Tyto články se stavějí většinou jako stacionární aplikace. Je nutné brát ohled především na dobu najíždění a materiálové vlastnosti komponent článků, které pak mezi jiným určují způsob a možnosti jejich použití.

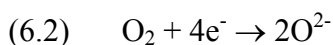
Jednotlivé reakce probíhající v palivovém článku typu SOFC pro vodík a oxid uhelnatý můžeme zapsat následovně:

Pro oxid uhelnatý jakožto palivo:

- reakce probíhající na anodě:



- reakce probíhající na katodě:

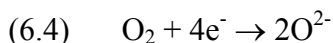


Pro vodík jakožto palivo:

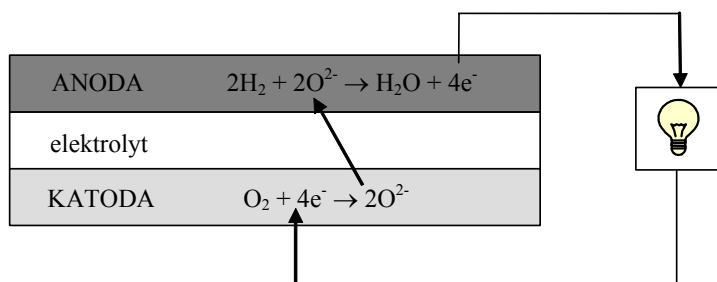
- reakce probíhající na anodě:



- reakce probíhající na katodě:



Provozní teplota pro palivový článek typu SOFC s elektrolytem na bázi yttriem stabilizovaného zirkonoxidu ($\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$) se nachází v rozmezí $800^\circ\text{C} \div 1\,000^\circ\text{C}$.



Obrázek 6-1 Schématické znázornění reakce v palivovém článku SOFC pro H_2 jakožto palivový plyn.

Chemizmus reakce palivového článku s vodíkem (průběh chemické reakce):

- Reakční plyny, kyslík a vodík, jsou odděleně dopravovány k prostorám elektrod. Kyslík na stranu anody, vodík na stranu katody, dochází ke kontaktu těchto plynů s katalyzátory.
- Molekula vodíku je na povrchu katalyzátoru štěpená na dva atomy vodíku a následně na dva protony H^+ , přitom každý z atomů odevzdává jeden elektron.
- Elektrony tekou vnějším elektrickým obvodem od anody ke katodě.
- Každé čtyři elektrony, po dosažení katody, rekombinují s molekulou kyslíku.
- Vzniklé kyslíkové ionty (anionty) O^{2-} následně procházejí elektrolytem (oxid zirkoničitý stabilizovaný yttriem) k anodě.
- Kyslíkové ionty O^{2-} odevzdávají negativní náboje protonům vodíku H^+ za vzniku vody H_2O .

S využitím principu článku typu SOFC se setkáváme již delší dobu v každodenním životě. Především je to v automobilech s řízeným katalyzátorem, kde je SOFC kyslíkovým senzorem, zvaným též „lambda sonda“. Jeho úkolem je detekce kyslíku ve výfukových plynech na vstupu do katalyzátoru. Tato sonda dává signál řídicí jednotce. Koncentrace kyslíku ve výfukových plynech je sledovanou výstupní veličinou procesu spalování a slouží zpětně k jeho regulaci.

Taktéž v energetice při řízení spalovacího procesu ve spalovacích komorách kotlů je používán kyslíkový senzor nazývaný „zirkoniová sonda“. Slouží pro detekci a stanovení koncentrace kyslíku. Jedná se též o aplikaci SOFC, jež v těchto zařízeních splňují základní požadavky na dynamiku odezvy systému detekce na změnu koncentrace měřené složky.

Obecně používanými materiály v těchto aplikacích jsou ytrem stabilizované oxidy zirkonia, a to pro jeho unikátní vlastnosti při detekci kyslíku.

Pro nás jsou v této publikaci především zajímavé přímé energetické aplikace této technologie, tedy palivové články.

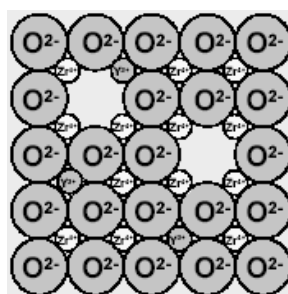
Jak již bylo zmíněno, palivový článek se obecně skládá především z anody, katody, elektrolytu. Další součásti slouží k propojení jednotlivých modulů do stacků, části sloužící k vlastnímu spojení s vnějším elektrickým obvodem, příprava vlastních reakčních plynů, systémy využití vysokopotenciálního tepla spalín, atd. V další části textu budou popsány jednotlivé externí systémy palivových článků typu SOFC, bez nichž by samotná konstrukce palivového článku byla málo účinná či naprosto nefunkční.

6.2 Popis základních stavebních prvků článku SOFC

6.2.1 Elektrolyt

Funkci elektrolytu u palivových článků typu SOFC obstarává iontově vodivý keramický materiál (tuhá látka) na bázi oxidů. Palivový článek je díky elektrolytu v pevné fázi principiálně konstrukčně jednodušší než ostatní palivové články a také kompaktnější. V paliv. článcích typu SOFC umožňuje právě tento elektrolyt transport O^{2-} iontu z katody k anodě, viz. obrázek 6-1.

Nejrozšířenějším, nejdéle známým a nejvíce odzkoušeným elektrolytem u těchto článků je oxid zirkoničitý ZrO_2 , stabilizovaný oxidem yttria Y_2O_3 (YSZ), viz. obrázek 6-2. Jsou však zkoumány i další perspektivní materiály, jež by se mohly z důvodu svých lepších vlastností stát náhradou za výše zmíněnou látku.



Obrázek 6-2 Schématické znázornění elektrolytu na bázi ZrO_2 , stabilizovaného Y_2O_3 .

Za teplot nad $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ se ZrO_2 stává vodivým pro O^{2-} ionty, nevodivý pro elektrony a zůstává trvale nepropustný pro plyny.

Iontová vodivost ytrem stabilizovaného ZrO_2 je při teplotě $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ asi $0,02\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$, při teplotě $t = 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ je již asi pětikrát vyšší a je srovnatelná s vodivostí kapalných elektrolytů. Tloušťka vrstvy tohoto elektrolytu může být velmi tenká, dosahovány jsou tloušťky v řádu

desítek μm . Důvodem pro získání co možná nejtenčí vrstvy elektrolytu je dosažení nízkého elektrického odporu.

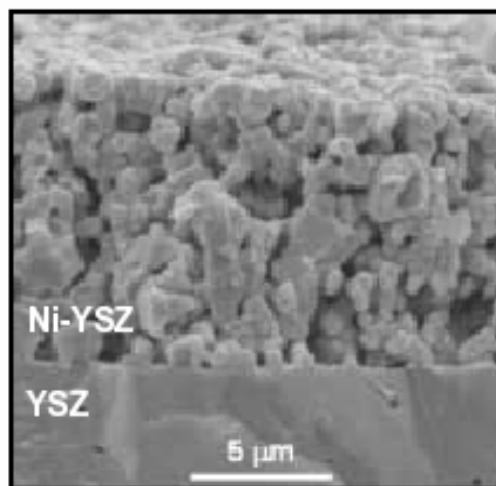
Dle nových poznatků se jeví jako možná vhodná látka pro elektrolyt, látka tvořená ZrO_2 s přísadou Sc_2O_3 . Předností oproti YSZ by měla být její vyšší elektrická vodivost za nižších teplot, a to teplot okolo 650 až 750 $^\circ\text{C}$.

Existují i další materiály, například CeO_2 , které díky svým vlastnostem jakožto iontové vodiče, mají vyšší vodivost iontů O^{2-} než ZrO_2 při srovnatelných teplotách. Tyto materiály jsou však méně stabilní a to především v prostředí s nízkou koncentrací kyslíku. Přídavkem speciálních dopantů, například Ga, můžeme jejich vlastnosti zlepšovat.

Jsou také zkoumány směsné keramické materiály na bázi oxidu $\text{La}_y\text{Sr}_x\text{Ga}_y\text{Mg}_z\text{O}$, které vykazují doposud nejvyšší iontovou vodivost. Při teplotách 800 $^\circ\text{C}$ dosahují vodivosti, jež dosahuje ytrem stabilizovaný ZrO_2 při teplotách 1 000 $^\circ\text{C}$. Vývoj v této oblasti není zdaleka ve fázi konečných a definitivních materiálových řešení, ba naopak. Z pohledu dlouhodobého nakládání a odzkoušení materiálu elektrolytu, jakým je oxid zirkoničitý ZrO_2 stabilizovaný oxidem yttria Y_2O_3 (YSZ), je tento materiál prozatím jednoznačně převládajícím v dosavadních pilotních a poloprovozních aplikacích a pravděpodobně bude i nadále charakteristickým materiálem v aplikacích s palivovými články typu SOFC. Samozřejmě s pokračujícím vývojem je můžeme očekávat jeho další modifikace či naopak, může dojít k nečekanému průlomu v materiálovém vývoji elektrolytů u palivových článků s pevnými oxidy.

6.2.2 Anoda

Pro anody jsou převážně používány směsné keramicko-kovové sintrované materiály na bázi niklu a stabilizovaného ZrO_2 . Kvůli zabezpečení dobrého transportu plynu a zaručení co možná největší reakční plochy je požadována porézní struktura materiálu anody, viz. obrázek 6-3. Její pórozita bývá u různých řešení v rozmezí 20 ÷ 50%.



Obrázek 6-3 Snímek - příklad struktury anody a elektrolytu.

Materiál anod může být také uzpůsobován k přímému katalytickému reformování a to především metanu na směs CO a H_2 .

Trvalejší provoz SOFC článků při vysokých proudových hustotách vede ke zvyšování odporu anody vlivem aglomerace Ni-částic.

6.2.3 Katoda

Katoda SOFC článků má ze stejných důvodů jako anoda porézní strukturu. Jsou vyrobeny buď z LaMnO_3 dopovaného stronciem, nebo různých směsných oxidů typu perovskit s p-typem vodivosti a směsnou iontovou a elektronovou vodivostí. Tyto materiály katod umožňují efektivní provoz palivových článků (společně s elektrolytem LSGM) i za teplot pod 800°C .

Nověji se ukazují jako vhodné, zvláště pro SOFC pracující za teplot pod 800°C , katody na bázi směsných kobaltitanů La, Sr a Fe (tzv. LSFC katody). Materiály na bázi LSFC a směsné materiály typu $\text{LSFC/Ce}_{0,9}\text{Sm}_{0,1}\text{O}_{1,95}$ mají oproti klasickým LSM katodám lepší kinetiku a vyšší difúzní koeficient kyslíku.

Při dlouhodobém provozu SOFC článků a častých cyklických změnách teplot je v některých případech problémem odtrhávání materiálu katody od elektrolytu. To samozřejmě vede ke zvyšování elektrického odporu a snižování životnosti soustavy.

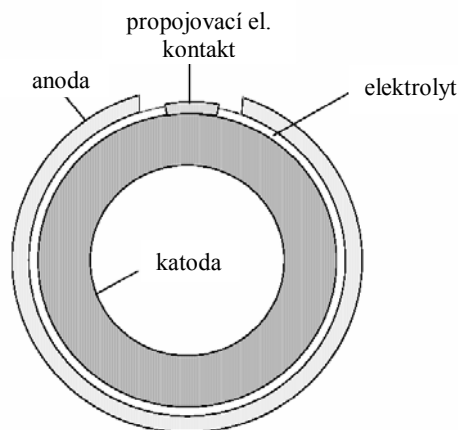
6.3 Konstrukční uspořádání modulu katoda, anoda a elektrolyt

Na základě uspořádání anody, elektrolytu a katody je možné palivové články rozdělit do dvou základních skupin, a to:

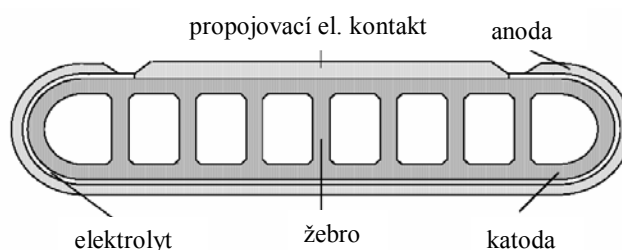
- s planárním uspořádáním, viz. obrázek 6-4,
- s trubkovým uspořádáním (tzv. systém tubular), viz. obrázek 6-5,
- a s HPD uspořádáním palivového článku, jakožto dalším stupeň vývoje systému tubular, viz. obrázek 6-6.



Obrázek 6-4 Schématické znázornění planárního uspořádání palivového článku.



Obrázek 6-5 Schématické znázornění trubkového uspořádání palivového článku.



Obrázek 6-6 HPD koncept uspořádání palivového článku

6.4 Uspořádání jednotlivých konceptů konstrukcí modulů palivových článků typu SOFC do stacků

Koncepty vývoje konstrukce a konstrukčního uspořádání článků SOFC, na základě v současnosti známých údajů, lze v zásadě rozdělit na dva základní, a to koncept trubkový, nazývaný též tubular, a koncept s planárním uspořádáním. Planární uspořádání můžeme dále rozdělit dle několika kritérií, především však na základě materiálu interkonektorů mezi jednotlivými články, a to na metalické a keramické, dále potom je-li samonosným prvkem elektrolyt nebo některá z elektrod a podle vlastního tvaru desek.

Nejdéle vyvíjeným a nejvíce propracovaným se jeví systém trubkový. Tento systém je vyvíjen především firmou Siemens Westinghouse. Obdoba tohoto systému je vyvíjena také firmou Mitsubishi Heavy Industry.

Nespornou výhodou těchto konstrukčních řešení je jejich velice dobrá mechanická stabilita, zjednodušené řešení ucpávek a skládání do svazků. Nevýhodou je velká hodnota vnitřního odporu článku. Tato nevýhoda trubkového systému, jež je dána tloušťkou vrstvy vlastního materiálu článku, dává argumenty pro vývoj systémů planárních, kde je možno dosahovat velmi malé tloušťky vrstvy elektrolytu a tím i vlastního odporu článku. U tohoto systému je však nutno počítat s konstrukčně složitějším systémem těsnění a s požadavkem velké

pečlivosti, s jakou je třeba tento konstrukční problém řešit, a to s ohledem na chemickou stabilitu daného těsnícího materiálu při vysokých teplotách a na chemickou stabilitu a mechanickou odolnost vlastní keramické hmoty článku.

Systém tubular je intenzivně vyvíjen již mnoho let. Výsledkem jsou systémy o výkonu do 200 kW. Tyto systémy se prozatím dají zařadit do kategorie poloprovozních jednotek. Mnohá výzkumná pracoviště a firmy se v poslední době zaměřují na planární uspořádání SOFC. Důvody jsou v podstatě dva, a to již zmíněná možnost zvyšování „hustoty výkonu“ článku (proudové hustoty) a snižování výrobních nákladů. Jednodušší je výroba desky z keramického materiálu, na kterou nanášíme příslušné vrstvy, než výroba stejné součástky ve tvaru trubky.

6.4.1 Trubkové uspořádání

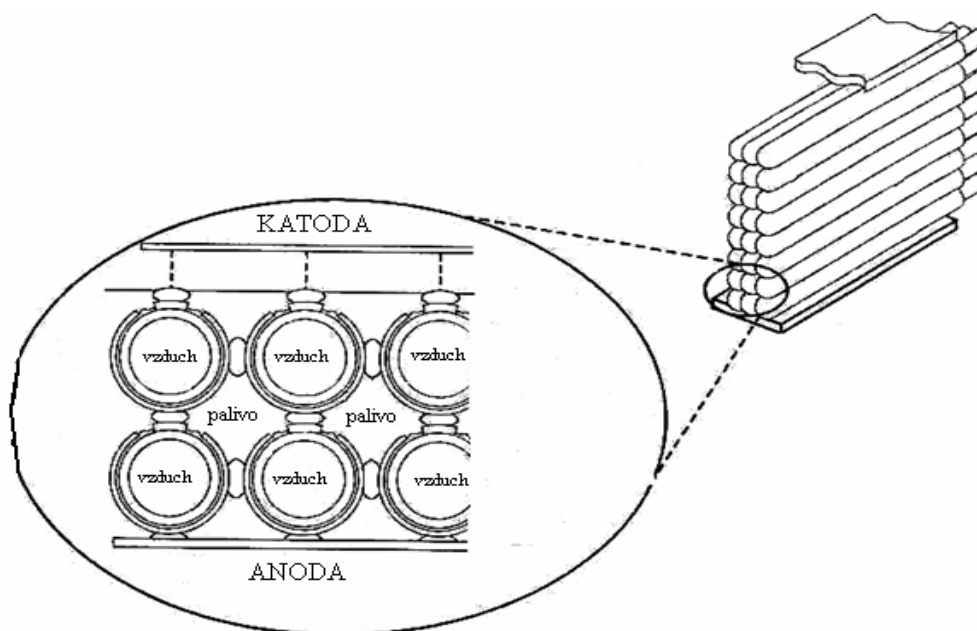
Jak již bylo řečeno, trubkové uspořádání palivových článků má výhodu oproti planárnímu uspořádání v možnosti konstrukce baterií těchto článků s velice jednoduchým konstrukčním řešením těsnění, či dokonce bez použití těsnících materiálů. Následuje odvod mírně unikajících palivových plynů a jejich následné vyhoření v dospalovací komoře s vlastním reakčním vzduchem ve funkci oxidantu.

První výzkumné práce na konceptu SOFC daného typu začaly ve firmě Westinghouse v 60. letech minulého století. V 70. letech byl vyvinut koncept s elektrolytem ve formě samonosných porézních trubek ze zirkonoxidu, pokrývaný materiálem elektrod. Tyto trubky měly délku 30 cm a jejich aktivní plocha byla 113 cm^2 . Průlom ve vývoji trubkové koncepce nastal v 80. letech, kdy byl použit koncept AES (Air Electrode Supported). Katoda se stává nosným prvkem konstrukce, je konstruována z porézního materiálu. Vrstva elektrolytu může tedy mít menší tloušťku a tím má i menší vlastní odpor. Bylo možné zvýšit „výkonovou hustotu“ článku, proudovou hustotu a také snížit výrobní náklady. Rozměry byly upraveny na prozatím platné, průměr trubky 22 mm, délka trubky 1810 mm, z toho 1500 mm aktivní, aktivní plocha článku tedy činí 834 cm^2 . Na samonosnou katodu je tedy nanášen elektrolyt, jehož tloušťka je cca $40 \mu\text{m}$. Na elektrolyt je nanášena vrstva anody. Jako spojovacího členu, interkonektoru, je použito slitiny lanthanu-stroncía-chrómu, jež je nanášena na těleso katodové trubky v podélném pásu, viz. obrázek 6-5. Materiál pro spojovací člen musí splňovat podmínku dobré elektrické vodivosti, chemické stálosti a odpovídající objemové roztažnosti. Takto vyrobený klíčový prvek SOFC článků má výkon přibližně 150 Watt, při teplotě 950°C .

Schéma uspořádání trubkového systému SOFC do svazků je znázorněno na obrázku 6-7. Spojovacím členem, interkonektorem, je spojena katoda předchozího palivového článku s anodou následujícího článku, což umožňuje spojení těchto palivových článků do série za účelem získání vyššího provozního napětí systému. Toto spojení však nemůže být realizováno „na přímo“. Je potřeba spojovacího členu mezi vlastním interkonektorem a anodovým povrchem následující trubky. Stejný člen je také mezi sousedícími trubkami ve svazcích. Tento spojovací člen musí mít odpovídající tvárnost a umožňovat tím zamezení vzniku prnutí při snižování rozestupů mezi jednotlivými trubkami díky jejich teplotní roztažnosti při zahřívání. Samozřejmý je zde požadavek na dobrou elektrickou vodivost. Toto splňují niklové spoje. Díky relativně

volnému spojení již tolik nezáleží na stejné délkové roztažnosti. Důležitá je kromě tvárnosti a elektrické vodivosti i chemická stálost.

Provedení uspořádání jednotlivých trubek do svazků je znázorněno na obrázku 6-8.

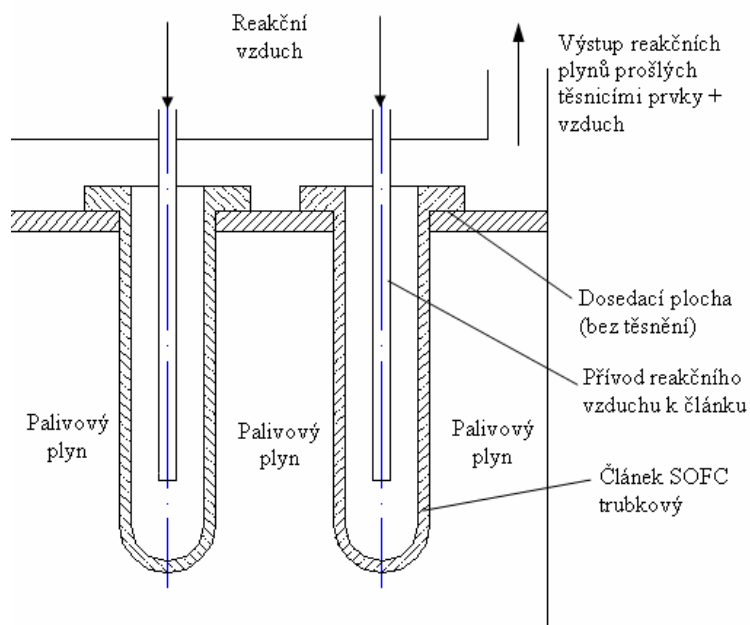


Obrázek 6-7 Schéma uspořádání trubkového systému SOFC, systém tubular.



Obrázek 6-8 Uspořádání svazku trubkového systému s palivovými články typu SOFC, systém tubular firmy Siemens Westinghouse Power Corporation

Co se týče těsnění, články díky vlastní tíži doléhají na těsnicí plochy. Jsou konstrukce, ve kterých jsou články ukládány do stacku (téměř) bez těsnicích prvků, viz. obrázek 6-9.



Obrázek 6-9 Schéma koncepce uspořádání trubkového systému SOFC (téměř) bez těsnění.



Obrázek 6-10 Jednotka SOFC 100 kW (obsahuje 1152 jednotlivých článků).

Celková koncepce sdružování svazků systému s trubkovými SOFC články je znázorněna na obrázku 6-10. Systém SOFC se skládá z vlastních trubkových článků uspořádaných do sekcí, přívodu předehřátého reakčního vzduchu pro každou trubku a přívodu paliva včetně jeho předehřevu smícháním s recirkulovanými katodovými plyny. Dále z odvodu spalín a odvodu „ucpávkových“ plynů obsahujících nezreagované topné plyny a vzduchu do dospalovací komory.

Pro palivové články typu SOFC se ve většině případů předpokládá s použitím zemního plynu jako primárního paliva. Poněvadž reakčními palivovými plyny jsou pro tuto technologii vodík H_2 a oxid uhelnatý CO , musíme zemní plyn reformovat (popis možných variant a vlastních dějů viz dále). Celý cyklus dějů probíhajících v systému SOFC je popsán v části 7.2.

Koncepty využití SOFC systému tubular mohou být navrženy jako typické teplárenské moduly s kogenerační výrobou tepla a elektrické energie, nebo jako moduly decentralizované výroby elektrické energie využívající odpadního tepla spalín v parním cyklu. Tlakové koncepty řešení SOFC článků pak navíc využívají spalovací turbínu.

6.4.2 Planární uspořádání SOFC palivového článku

Planární články mají výhodu v relativně jednoduché a snadno automatizovatelné výrobě pomocí páskového odlévání a síťového tisku elektrod. Jejich nevýhodou je větší křehkost za vysokých teplot pod mechanickým napětím a problémy s utěsněním baterií článků s kovovými bipolárními spojovacími členy. Jako příklady konstrukcí planárního uspořádání SOFC článků jsou popisovány v následujících odstavcích vybrané konstrukce a to od firmy Siemens, Sulzer Hexis a institutu Forschungszentrum Jülich. Lze říci, že zmíněné konstrukce a řešení pak s dostatečnou reprezentativností postihují současný stav v této oblasti. Tyto technologie se zdají být prozatím nejvíc propracované s nejbližší možným nasazením do polokomerční oblasti.

Systém HEXIS

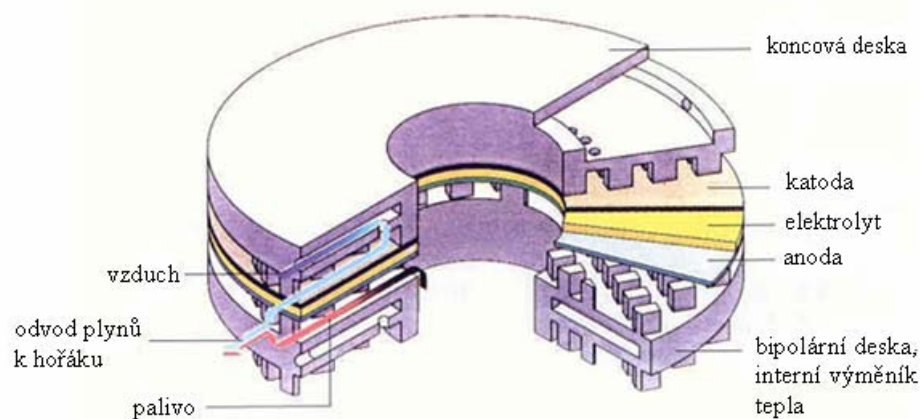
Planární uspořádání palivového článku typu SOFC systému HEXIS má oproti uspořádání tubular jednu nespornou výhodu, a tou je jednoduchá výroba jednotlivých modulů anoda, katoda, elektrolyt. Tloušťka tohoto modulu je 0,1 až 0,2 mm. Jak již bylo zmíněno výše, čím je tenčí vrstva elektrolytu, tím menší je odpor této vrstvy a tím větší je dosahovaná proudová hustota. Toto uspořádání však přináší určité problémy při vlastním řešení těsnosti systému, v návaznosti na nutnost respektovat tepelnou roztažnost použitých materiálů.

Je známo mnoho konstrukčních uspořádání planárního článku, varianta dle Sulzer Hexis je jedna z možných variant uspořádání, viz. obrázek 6-11. Je koncipována pro jednotky menších výkonů, především pro kogenerační výrobu tepla a elektrické energie v obytných budovách.

Je tvořena články ve tvaru disků. Každý modul anoda, katoda, elektrolyt je ukončen bipolární deskou, která je konstruována ze slitin chromu, viz. obrázek 6-12. Samonosným prvkem tohoto systému je elektrolyt.

Vnitřním osovým otvorem stacku je přiváděno palivo, které radiálně vystupuje do každého článku systémem kanálků, kde přichází do kontaktu s anodou.

Na katodu je přiváděn vzduch, který vstupuje radiálně směrem do středu válce a to tělesem bipolární desky, kde se ohřívá a následně prochází do prostoru systému kanálků na straně katody článku, kde proudí souběžně se směrem proudění palivového plynu a účastní se výše popsané elektrochemické reakce článku.



Obrázek 6-11 Schéma planárního uspořádání SOFC článku systému HEXIS.

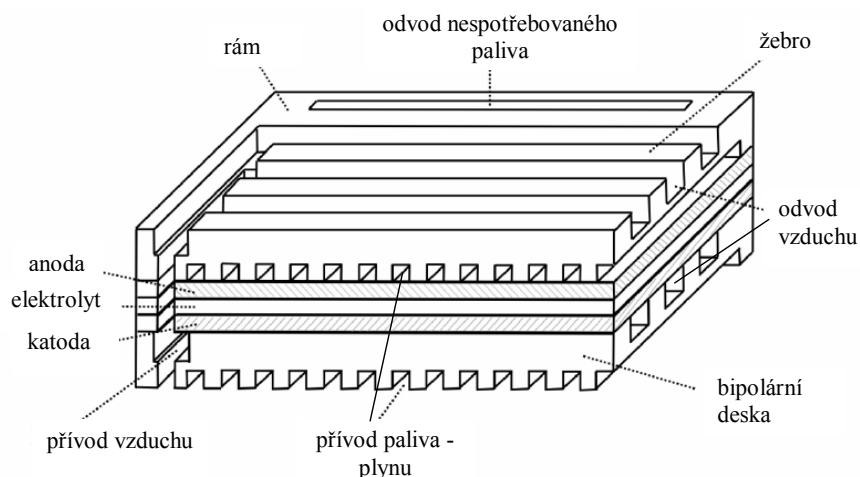
Vnější průměr mezikruží je 120 mm, vnitřní otvor, jímž je přiváděno palivo, má průměr 20 mm.



Obrázek 6-12 Bipolární deska dvouvrstvá (interkonektor) a článek (zelle) systému HEXIS.

Planární uspořádání čtvercového průřezu

Další možnosti planárního uspořádání systému s palivovým článkem typu SOFC je systém „jednoduchých“ desek čtvercového průřezu, naznačený na obrázku 6-13. Tyto konstrukce jsou vyvíjeny především firmou Siemens a institutem Forschungszentrum Jülich (FCJ).



Obrázek 6-13 Planární konstrukční uspořádání systému SOFC článku.

Konstrukce se samonosným elektrolytem.

Elektrolytem je opět ytrem stabilizovaný oxid zirkoničitý. Tloušťka vrstvy je pro většinu aplikací v rozmezí 100 až 200 μm , aktivní plocha pak bývá nejčastěji 10 x 10 cm. Na elektrolyt, jakožto nosný prvek, je ze strany přívodu paliva nanese anodová vrstva (tvořena nikl-cermetem), na stranu přívodu vzduchu pak katodová vrstva (tvořená lanthan-manganitem). Materiál elektrod je pak zároveň i katalyzátorem pro chemickou konverzi přivedených plynů na tzv. třífázovém rozhraní plyn/elektroda/elektrolyt. Porózita elektrod u těchto aplikací je cca 30%. Typické pracovní teploty odpovídají požadavku elektrolytu a pohybují se v rozmezí 850 až 1 000 $^{\circ}\text{C}$.

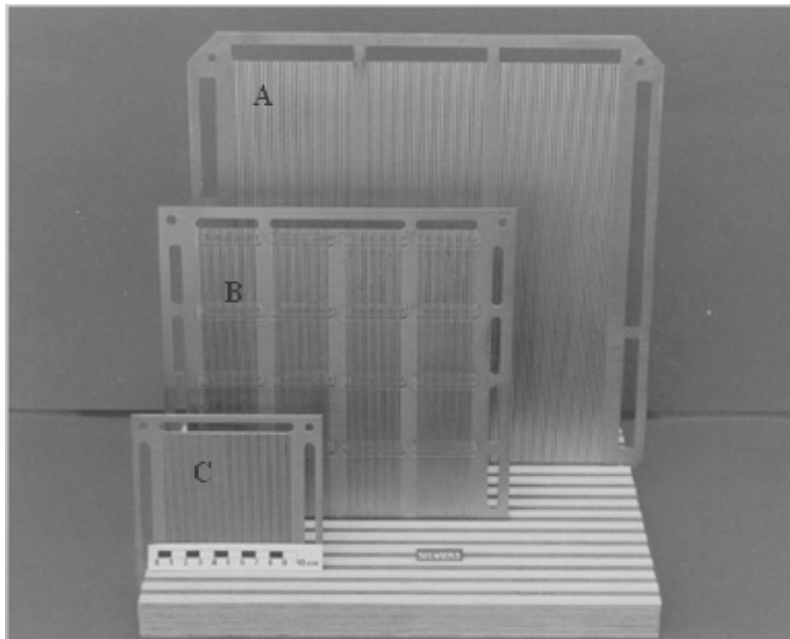
Díky těmto vysokým teplotám byly především v počátcích vývoje těchto aplikací s SOFC články používány pro bipolární desky keramické materiály (na bázi lanthanu-chromitu). Tento materiál se však neosvědčil, jelikož má malou elektrickou a tepelnou vodivost, rozdílné teplotní roztažnosti v oxidační atmosféře vzduchu a atmosféře palivových plynů, dále vysokou teplotu sintrace. Proto se trend vývoje začal ubírat směrem ke kovovým materiálům bipolárních desek (interkonektorových desek). Tyto materiály umožňují podstatné zvětšení ploch těchto desek.

Konvenční vysokoteplotní oceli mají ve srovnání s materiálem elektrolytu příliš velkou teplotní roztažnost a jsou proto pro tento účel nepoužitelné. Byly proto vyvinuty slitiny, které daným požadavkům vyhovují. Příkladem může být slitina sestávající se z chromu, 5% železa a 1% oxidu yttria. Tato slitina je používána v aplikacích planárních systémů firmou Siemens a Sulzer.

Planární palivový článek typu SOFC firmy Siemens

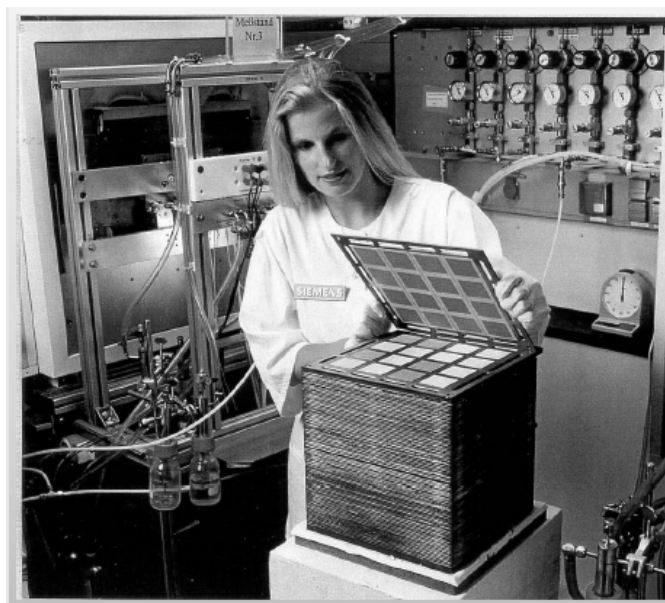
Koncept planárního uspořádání palivového článku typu SOFC firmy Siemens se ubírá směrem samonosného elektrolytu a čtvercového půdorysu. Jsou prezentovány řešení desek o rozměru převážně 50 x 50 mm, umístěných ve čtveřici na jedné bipolární desce výše uvedeného materiálu, viz. obrázek 6-14. "Sendvič", který je složen z modulů 50 x 50 mm řazených po 16 na plochu bipolární desky, v 80 vrstvách, vykazoval během testů výkon 5,4 kW_e , při provozu na

H₂/vzduch a pracovní teplotě 950°C. Při teplotě 850°C a při zachování paliva a okysličovadla činil dosažený výkon 4,1 kW_e. Další kroky vývoje tohoto uspořádání směřují s největší pravděpodobností k zvětšování plochy článku na 100 x 100 mm. Tomu odpovídá zvětšení plochy bipolárních desek a řazení v uspořádání 9 článků na plochu, viz. obrázek 6-14, varianta A.



Obrázek 6-14 Planární uspořádání SOFC článku firmy Siemens.

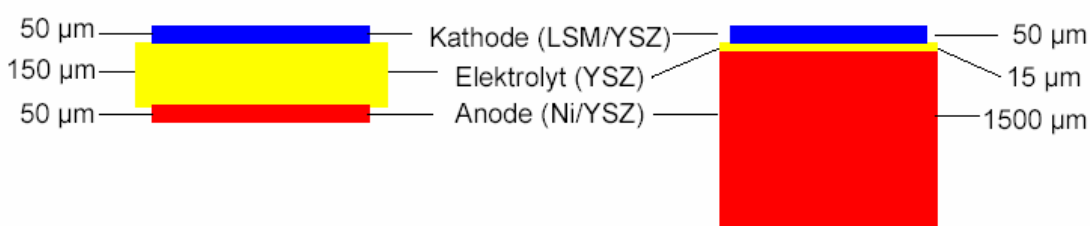
- A ... 100 x 100 mm řazené po 9 na plochu, aktivní plocha elektrody činí 792 cm²
- B ... 50 x 50 mm řazené po 16 na plochu, aktivní plocha elektrody je 256 cm²
- C ... 100 x 100 mm, aktivní plocha elektrody je 81 cm²



Obrázek 6-15 Planární systém paliv. článku typu SOFC s výkonem 5 kW firmy Siemens.

Planární uspořádání SOFC vyvíjené institutem Forschungszentrum Jülich (FZJ)

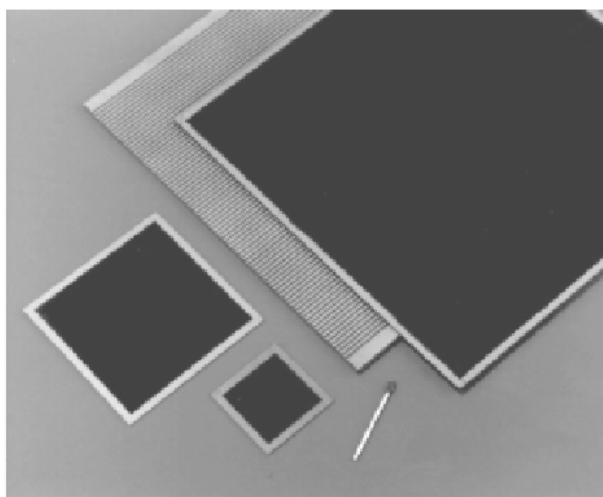
Konstrukční uspořádání planárních článků je ve své podstatě u většiny konstrukcí, jak vlastního stacku a tak i jednotlivých článků, obdobné. Výzkum a vývoj se tedy zaměřuje především na samotné řešení aktivních členů článku. V konceptech řešení planárních SOFC článků v FZJ je jedním z řešených aspektů možnost snížení pracovní teploty článku. Se snižováním pracovní teploty článku však roste iontový odpor elektrolytu. Řešením je hledání nových materiálů, nebo snižování tohoto navýšení odporu elektrolytu použitím různých jiným mechanismů. Lze toho docílit ztenčováním vrstvy elektrolytu. V tomto případě není při dosažení určité tloušťky vrstva elektrolytu již schopna plnit funkci nosného prvku, nutno ji tedy zastoupit jiným materiálem. V konceptu FZJ je jako nosná struktura používána anoda, viz. obrázek 6-16.



a) samonosným prvkem je elektrolyt. b) samonosným prvkem je anoda (FCJ).

Obrázek 6-16 Planární uspořádání systému s SOFC článkem a možné způsoby řešení samonosného prvku článku.

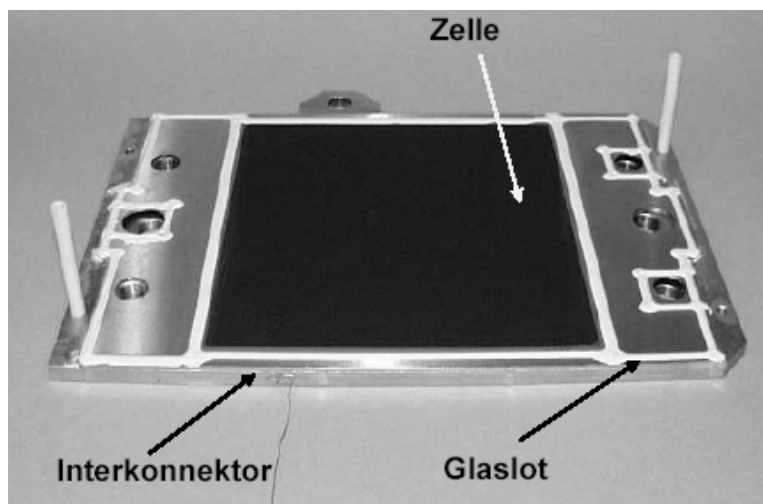
Díky své výborné elektrické vodivosti (nikl-cermet) není tloušťka vrstvy problémem. Taktéž se jedná o materiál o relativně velké pevnosti. Tento koncept je vyvíjen ve FZJ od roku 1993. Při stejné výkonové a proudové hustotě je možno, v porovnání s klasickým řešením, pracovní teplotu článku snížit na 700 až 800 °C.



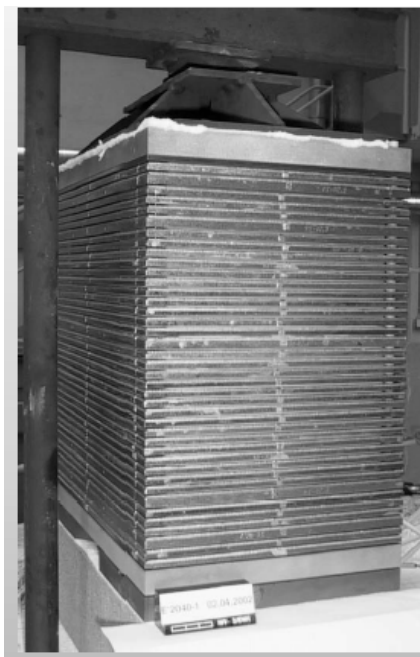
Obrázek 6-17 Příklad planárního řešení SOFC článku dle FZJ s aktivní plochou elektrod od 16 do 576 cm².

Toto řešení umožňuje dále použití feritických ocelí legovaných chromem jako interkonektorů, neboť jejich tepelná roztažnost v oblasti zmíněných teplot je stejná jako materiálu elektrod (anody). Použití těchto materiálů navíc slibuje další snížení výrobních nákladů na článek.

Použití tohoto řešení a materiálu anody nabízí možnost zvětšování plochy článku. Příklad vzhledu planárního řešení elektrolytu, bipolárních desek a interkonektorů, viz. obrázek 6-17 a obrázek 6-18.



Obrázek 6-18 Planární palivový článek systému SOFC z FZJ.



Obrázek 6-19 Planární systém typu SOFC s výkonem 9 kW z FZJ, (Anodensubstrat-Stack).

Na obrázku 6-19 je znázorněn laboratorní stack o 40 článcích, s aktivní plochou o rozměru 200 x 200 mm. V případě použití vodíku jako paliva bylo dosaženo výkonu 9,2 kW ($0,83 \text{ A/cm}^2$) při teplotě článku 806°C a teplotě vstupujících a vystupujících plynů 585°C . Při použití metanu jakožto paliva bylo dosaženo výkonu 5,4 kW ($0,5 \text{ A/cm}^2$) při teplotě článku 793°C a teplotě vstupujících a vystupujících plynů 585°C .

6.5 Navazující externí technologie palivových článků SOFC

Pro správnou funkci palivového článku a odpovídající životnost, jsou nepostradatelné další navazující technologie, a to především:

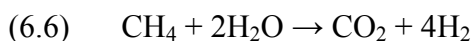
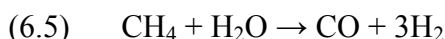
- technologie přípravy paliva, skládající se z:
 - (parního) reformingu zemního plynu, jež u aplikací SOFC může být:
 - externí,
 - nepřímý interní (vnitřní),
 - přímý interní (vnitřní),
 - nebo parciální oxidace,
 - čištění plynu,
- najížděcí topné soustavy,
- spalovací komory, hořáku,
- technologie využití fyzického tepla odpadních plynů,
- měřicí a regulační techniky

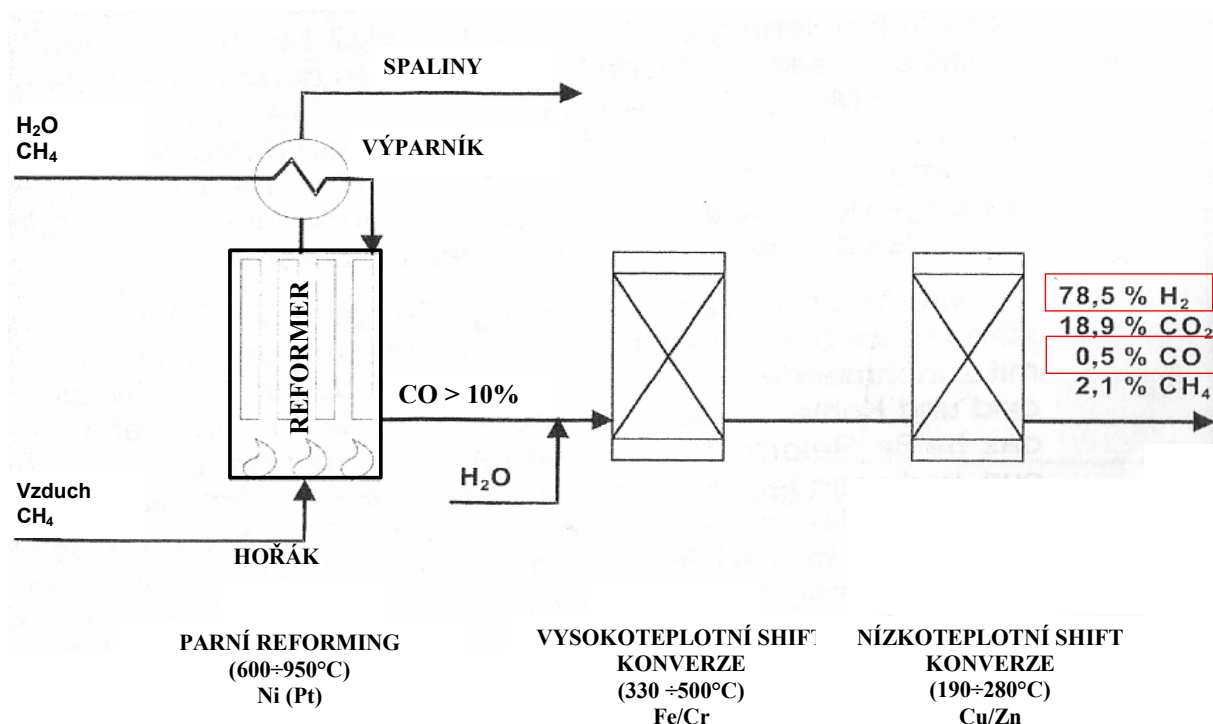
6.5.1 Parní reformování paliv

Parním reformováním uhlovodíků je označován proces, při kterém dochází k jejich převodu na jednodušší paliva. Parní reformování je běžně používaný způsob výroby plynů, především vodíku, z uhlovodíků v chemickém průmyslu. Je to metoda, jejíž teoretické základy jsou dobře známy a aplikovány. Je to vhodná metoda výroby plynného paliva pro palivové články. Těmito plyny máme na mysli vodík a oxid uhelnatý. Provádí se za teplot nad 600°C , často za teplot $700 \div 800^\circ\text{C}$. Schéma parního reformeru a příklad složení plynů po reformování metanu přebytkem vodních par, je uvedeno na obrázku 6-20. Změny složení plynů v závislosti na teplotě jsou uvedeny na obrázku 6-21.

Parní reforming

Parní reforming lze považovat za vhodnou aplikaci pro palivový článek typu SOFC, především při přípravě paliva ze zemního plynu, jež je složen přibližně z 98% metanu. Reakce parního reformingu metanu probíhá v podstatě podle dvou nezávislých reakčních rovnic, a to:



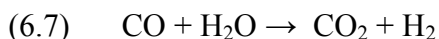


Obrázek 6-20 Schéma externího parního reformingu se zařazenou shift konverzí.

Tyto reakce probíhají v teplotním okně 600 až 950°C na katalyzátoru, kterým je ve většině případů nikl, případně platina. Optimální hodnota molárního poměru přiváděné vodní páry k přivodu metanu je $H_2O/CH_4 = 2$. Dosažený rovnovážný stav je samozřejmě závislý na parametrech procesu, kterými jsou také tlak, teplota a zmíněný přebytek vodních par v systému. I při optimálním průběhu procesu parního reformingu metanu (zemního plynu) je zřejmé, že koncentrace oxidu uhelnatého se bude pohybovat okolo 10 % objem. Tento plyn je, jak již bylo řečeno, palivem pro SOFC.

Složení plynů po parním reformingu je tedy vyhovující pro vysokoteplotní palivové články, pro technologii MCFC i SOFC.

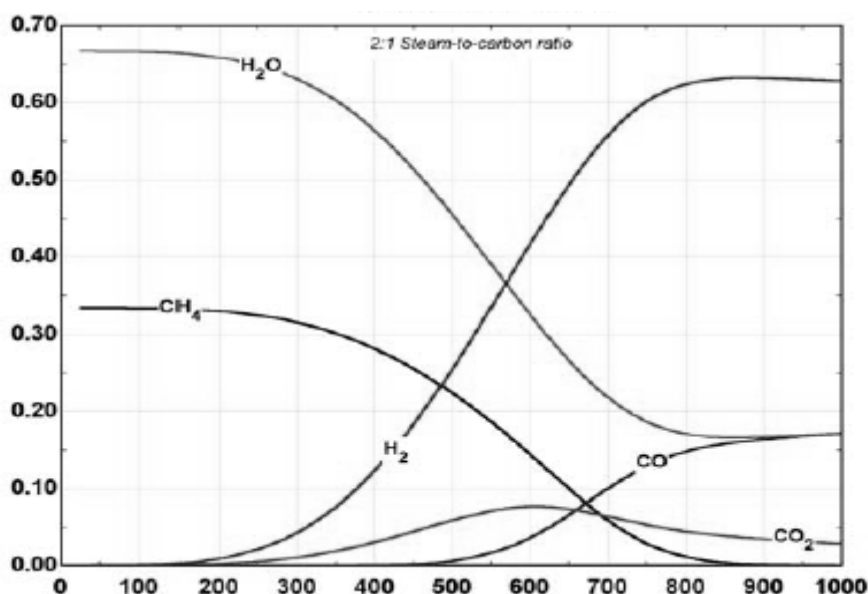
Pro obecné shrnutí této problematiky v širším kontextu palivových článků je nutno říci, že koncentrace CO po parním reformingu zemního plynu je absolutně nevhodná pro palivové články typu PEM a PAFC. Z tohoto důvodu se za reformer další stupně konverze plynu nazývané shiftkonvertory. Na katalyzátorech shiftkonvertorů potom probíhá exotermní reakce:



Tyto konvertory se dělí na vysokoteplotní a nízkoteplotní:

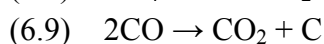
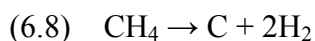
- Vysokoteplotní konvertor pracuje v rozsahu teplot 330 až 500 °C, katalyzátorem je Fe/Cr.
- Nízkoteplotní konvertor pracuje v rozsahu teplot 190 až 280 °C, katalyzátorem je CuZn.

Plyn zpracovaný reformingem po průchodu shiftkonvertorem obsahuje objemový podíl oxidu uhelnatého cca 0,5 až 1%, což je již koncentrace vhodná pro přímé použití plynu v palivovém článku typu PAFC.



Obrázek 6-21 Reakční rovnováha parního reformingu při poměru $\text{H}_2\text{O} / \text{CH}_4 = 2$ a tlaku 10^5 Pa v závislosti na teplotě.

Reformování je silně endotermní reakcí a vyžaduje přívod tepla a vhodné katalyzátory. Proces reformování je nutno vést odpovídajícím způsobem, aby bylo zabráněno produkci sazí, která může nastat vlivem krakování a pyrolýzy uhlovodíků a rozkladu CO:



Pyrolýza metanu je endotermní a významná za teplot nad 700°C . Pyrolýza jiných uhlovodíků probíhá za nižších teplot.

Exotermní rozklad CO je významný hlavně za nižších teplot, přibližně pod hranicí 600°C . Tvorbě uhlíku se dá tedy zabránit dodržením procesní teploty, úpravou katalyzátoru a především přebytkem vodních par v procesu reformování.

Důležité a v technologii SOFC používané je před-reformování (prereforming) zemního plynu, vedoucí k odstranění vyšších uhlovodíků s velkou tendencí tvorby uhlíkatých úsad a snižující spotřebu tepla při vlastním interním (vnitřním) reformingu.

Niklové katalyzátory mají tendenci podporovat vznik a usazování uhlíku, proto je nutné je dopovat, např.: alkalickými kovy, nebo při silné tendenci k tvorbě sazí použít jiné katalyzátory, např.: Ru na ZrO_2 a Al_2O_3 .

Vysokoteplotní palivové články dovolují realizaci parního reformování uvnitř palivového článku (internal reforming). Vnitřní reformování má dvě základní koncepce a to přímé (DIR) a nepřímé (IIR) vnitřní reformování.

V případě **přímého vnitřního reformování** se proces realizuje přímo na anodě nebo v blízkosti anody. Teplo a pára potřebné pro reakci jsou dodávány přímo elektrochemickou reakcí, odchozí reakční plyny jsou částečně recirkulovány do proudu palivových plynů, tak je k dispozici i vodní pára jakožto nezbytný prvek reformingu. Vysokoteplotní články typu SOFC používají většinou nikl-keramických (Ni-ZrO₂ cermetových) anod. Tento materiál je při přímém reformování na anodě palivového článku dostatečně trvanlivý. Pro nižší teploty je také možné použít Ce-Ni cermetové katalyzátory dopované vápníkem. Především u systémů využívajících plynů s obsahem vyšších uhlovodíků je v systému reformingu začleněno částečné externí reformování. V tzv. prereformeru je 40 až 60% uhlovodíků externě reformováno, a to z důvodu snížení tepelného efektu, vliv endotermické reakce reformingu, při reformování paliv. Díky tomu nejsou na samotném palivovém článku tak velké teplotní rozdíly a také nedochází k depozici uhlíku.

V případě **nepřímého interního reformingu** probíhají reakce v odděleném prostoru, který je vyhříván reakčním teplem elektrochemické reakce palivového článku.

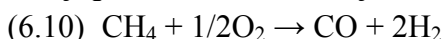
Vnitřní reformování má oproti vnějšímu mnohé výhody, a to především:

- náklady na vlastní jednotku jsou menší,
- u metody přímé (DIR) je zapotřebí méně nebo dokonce žádná externí pára, u systémů s recirkulací anodových plynů toto platí i pro nepřímé (IIR) (je však třeba zajistit přívod páry během najíždění, kdy pára jakožto produkt reakce na článku ještě není k dispozici),
- je dosahováno relativně vysoké konverze (vodík je produkován přímo na anodě).

Mezi nevýhody vnitřního reformování patří:

- nutná úprava anody (a katalyzátoru nebo použití dalšího přídavného katalyzátoru),
- katalyzátor může být deaktivován nebo může být otráven (např. sírou), může se sintrovat,
- materiál aktivního členu je mnohdy díky rozdílnosti v tepelných zabarvení reakcí vystaven teplotním stresům,
- možné omezení flexibility provozu palivového článku způsobené integrací endotermního reformování a exotermní elektrochemické reakce.

Další metodou používanou pro přípravu palivových plynů pro vlastní palivový článek typu SOFC je **parciální oxidace**. Zjednodušeně je možno průběh reakce vyjádřit:



Reakce je vedena při odpovídající teplotě a podstechiometrickém přívodu kyslíku. Díky silně podstechiometrickému přívodu kyslíku je metan pouze částečně oxidován. Afinita kyslíku k uhlíku je větší než k vodíku, což znamená, že oxidace probíhá téměř výlučně s uhlíkem. Vodík pak zůstává neoxidován.

7 JEDNOTKY SOFC O VÝKONECH ŘÁDU JEDNOTEK AŽ DESÍTEK KW URČENÉ PRO KOGENERAČNÍ VÝROBU TEPLA A ELEKTRICKÉ ENERGIE V OBYTNÝCH BUDOVÁCH

Z doposud známých kompaktních konstrukcí jednotek SOFC určených pro kogenerační výrobu tepla a elektrické energie v obytných celcích se zdají být, jakožto jednotky odpovídající technologické a uživatelské úrovni, vhodné jednotky firem Sulzer Hexis Ltd. a firmy Siemens. Tyto jsou dále popsány v jednotlivých částech této kapitoly. Jsou to prozatím jednotky polokomerční, začínající se objevovat především v demonstračních aplikacích této výkonové kategorie.

7.1 Sulzer Hexis SOFC

Schéma jednotky SOFC fy Sulzer Hexis Ltd. uzpůsobené pro použití v kogeneračním provozu systému obytného objektu je znázorněno na obrázku 7-1. Tento systém se skládá z vlastního stacku článků, viz. obrázek 7-2, ke kterému je přiváděn zemní plyn a vzduch.

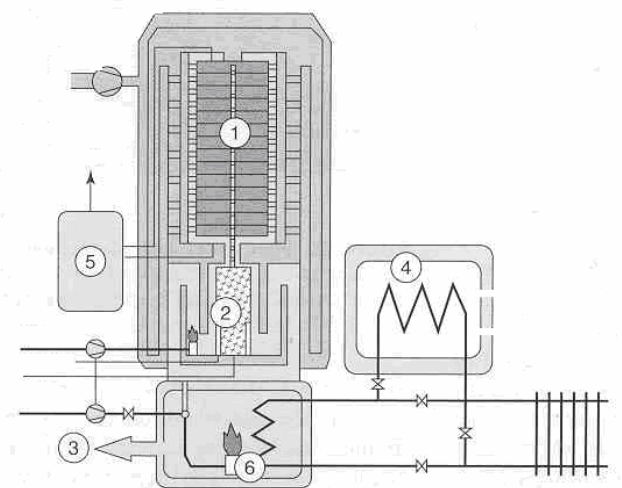
Vzduch je ohříván průchodem vnitřním opláštěním článku, dále pak ve vlastním stacku a u systému HXS 1000 PREMIERE průchodem tělesa bipolární desky.

Zemní plyn prochází prereformerem, nebo parciální oxidací a dále proudí osově k středové části válce (stacku) článků. Plyn je nutno před přívodem na prereformer a článek zbavit sloučenin síry, které se chovají jako jed pro katalyzátor na bázi Ni. Z toho důvodu je před vlastní technologií článku zařazena odsiřovací jednotka. Nezbytnou součástí systému je najížděcí hořák, kde je ve fázi najíždění spalován plyn pro kontrolované, rovnoměrné zahřátí systému.

Odpadní plyny z reakce na článku odevzdávají teplo ve výměníku tepla pro vytápění nebo ohřev TUV. V systému je k dispozici i podpůrný hořák pro zmíněné okruhy zásobování teplem v případě nedostatku výkonu z článku.

Díky konstrukci výše popsaného planárního systému typu Hexis je přiváděným plynným médiím kladen velmi malý hydraulický odpor. Proto při provozu jednotky na zemní plyn je přetlak v potrubní síti nízkotlakého rozvodu plynu dostačující pro vlastní provoz jednotky. Není tedy nutno použít na straně paliva ventilátoru. Tímto je dále systém zjednodušen a odpadá jeden ze členů podílejících se na vlastní spotřebě jednotky. Okolní vzduch, jakožto oxidant, je nutno přivádět pomocí ventilátoru. Odváděná směs plynů (produkty reakce, nezreagované palivové plyny a vzduch) je vedena přes dospalovací komoru k výměníku tepla a dále do komína.

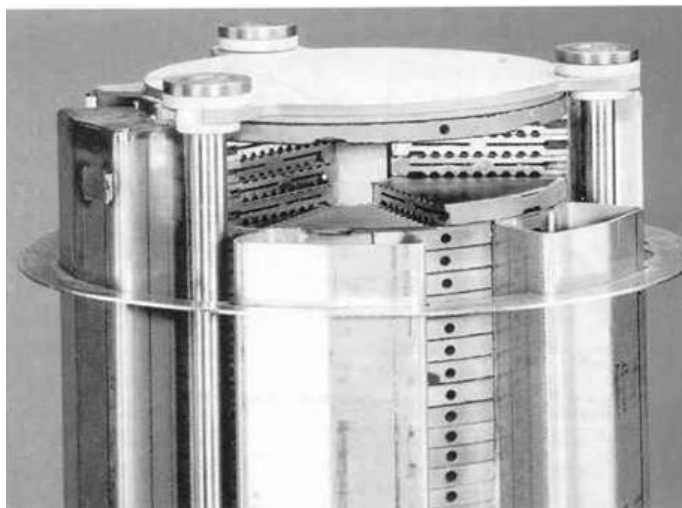
Vlastní jednotka fy Sulzer Hexis Ltd. je znázorněna na obrázku 7-3. Jedná se o kompaktní, samoobslužný energetický celek.



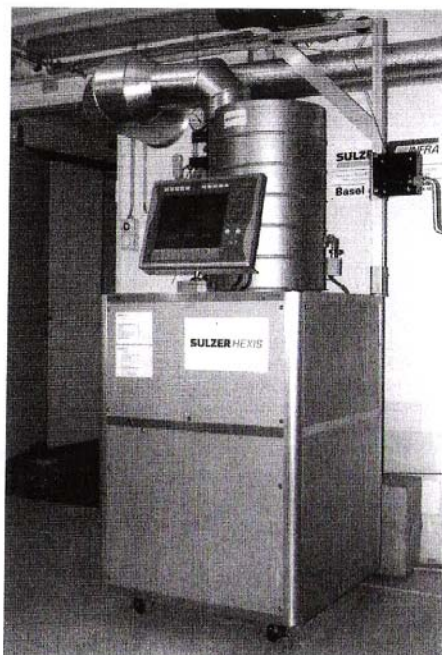
- | | |
|----------------------------------|---|
| 1. Stack, palivový článek, | 4. zásobník TUV, |
| 2. prereformer, najížděcí hořák, | 5. střídač proudu, kontrolní a řídicí systém, |
| 3. výstup spalin, | 6. hořák. |

Obrázek 7-1 Koncepce uspořádání systému SOFC výkonu $P_{el} = 1 \text{ kW}$ Sulzer Hexis.

Výše uvedený koncept je firmou Sulzer Hexis Ltd. vyráběn jako pilotní zkušební série od roku 2001 pod označením HXS 1000 PREMIERE. Dle údajů výrobce bylo instalováno 110 jednotek v rodinných domcích a větších obytných budovách.



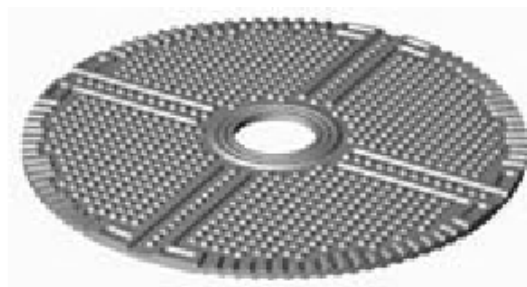
Obrázek 7-2 Koncepce planárního uspořádání stacku SOFC v jednotce *HXS 1000 PREMIERE* fy Sulzer Hexis Ltd.



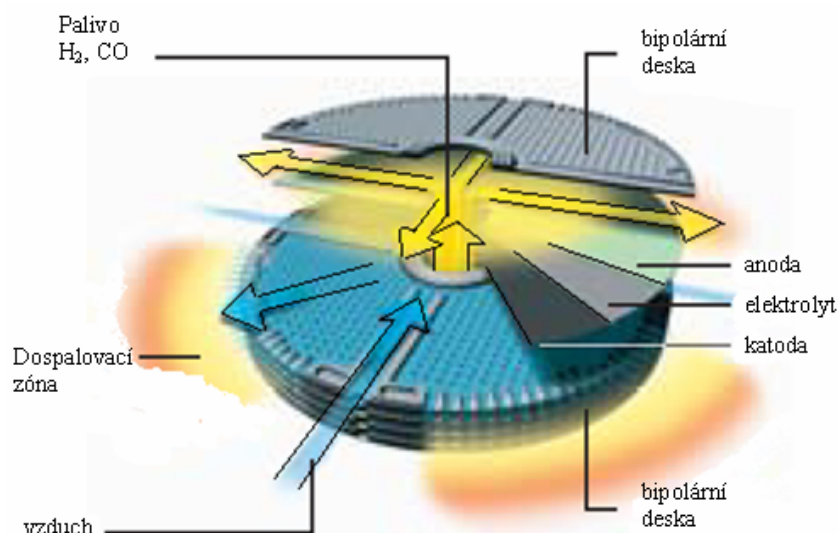
Obrázek 7-3 Jednotka SOFC Sulzer Hexis HXS 1000 PREMIERE uzpůsobená pro použití v kogeneračním provozu v energetickém systému obytného objektu.

Vývojově nejnovější konstrukcí firmy Sulzer Hexis, vyvíjené paralelně s výše zmíněným systémem a čerpající ze zkušeností s provozem systému PREMIERE, je systém označovaný názvem Galileo. U tohoto systému se výrobci podařilo značně omezit rozměry a vlastní hmotnost. Navíc, jednotka je i jednodušší, čímž je vytvořen předpoklad pro snižování výrobních nákladů. Základní principy, jež byly popsány výše, zůstaly zachovány. Rozdílná je konstrukce „sběrače proudu“, bipolární desky, která z dvoudeskové konstrukce byla navržena jako jednodesková, viz. obrázek 7-4. Další významnou změnou bylo nahrazení parního reformingu parciální katalytickou oxidací paliva. Toto řešení umožňuje vynechání členu přípravy a výroby najížděcí páry pro parní reforming. Palivo, zemní plyn, je možno přivádět přímo při tlaku v rozvodné síti. Dle údajů výrobce je možno vynechat i stupeň odsiřování.

Elektrický výkon jednotky je 1 kW. Tato hodnota výkonu by měla dle všech předpokladů pokrývat spotřebu jednogeneračního domu. Systém pracuje v paralelním provozu s elektrickou sítí.



Obrázek 7-4 Jednoplátový design bipolární desky.



Obrázek 7-5 Stack SOFC systému Galileo.

Tabulka 7-1 Základní specifikace SOFC článku GALILEO fy Sulzer Hexis Ltd.



Základní parametry jednotky	
Rozměry	550 x 550 x 1 600 mm
Hmotnost	170 kg
Elektrický výkon	1 kW max.
Tepelný výkon článku	2,5 kW max.
Výkon přídavného topného hořáku	20 kW
Účinnost elektrická	25 ÷ 30% předpoklad je > 30%
Účinnost celková	85%
Palivo	zemní plyn

7.2 Demonstrační systém SOFC typ Beta 5 kW fy Siemens

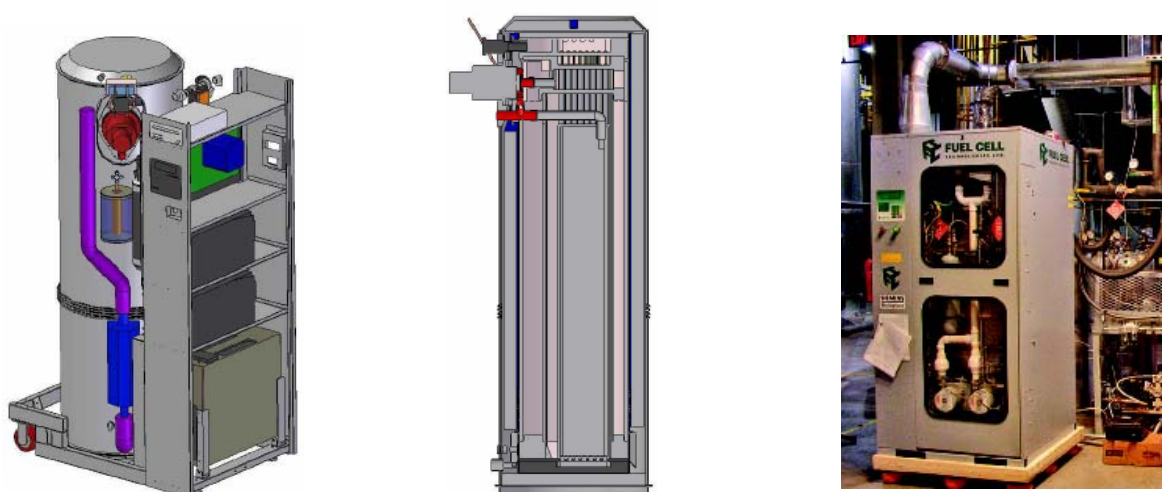
Beta systém je uspořádán do kontejnerového celku s možností vyjmutí jednotlivých modulů z důvodu inspekce a oprav. Jedná se o jednotku čistě stacionární, viz. obrázek 7-6. Vlastní jednotka SOFC je se souvisejícími technologiemi uložena ve dvou soustředných válcích z nerez oceli, vnější je tepelně izolován. Jedná se o klasickou trubkovou konstrukci tubular. Vlastní systém SOFC článků se skládá ze dvou svazků, každý po 24 článků typu tubular o aktivní délce 1,5 m. Pracovní teplota je cca 975 °C. V mezikruží válců je veden reakční vzduch, který je zahříván na teplotu cca 600 °C.

Systém zásobování procesním vzduchem se skládá z filtračního členu, ventilátoru a vlastního rozvodu vzduchu, jehož je součástí i přívod vzduchu k najížděcímu hořáku.

Systém zásobování palivovým plynem má dvě modifikace, jež jsou použity především v závislosti na tlaku plynu v síti, který dále podmiňuje možnost použití injektoru pro recirkulaci anodových plynů. V případě tlaku plynu menšího než 2 psig je nutný elektricky poháněný ventilátor (recirkulátor na straně horkých plynů).

Dále je to vstupní filtr, měření hmotnostního toku pro stack a pro najížděcí hořák a odsiřovací jednotka.

Systém využití tepla se skládá z výměníku spaliny-voda, který je součástí jednotky. Výměník je pevnostně konstruován i pro případ havárie a výpadku cirkulace vody v systému.

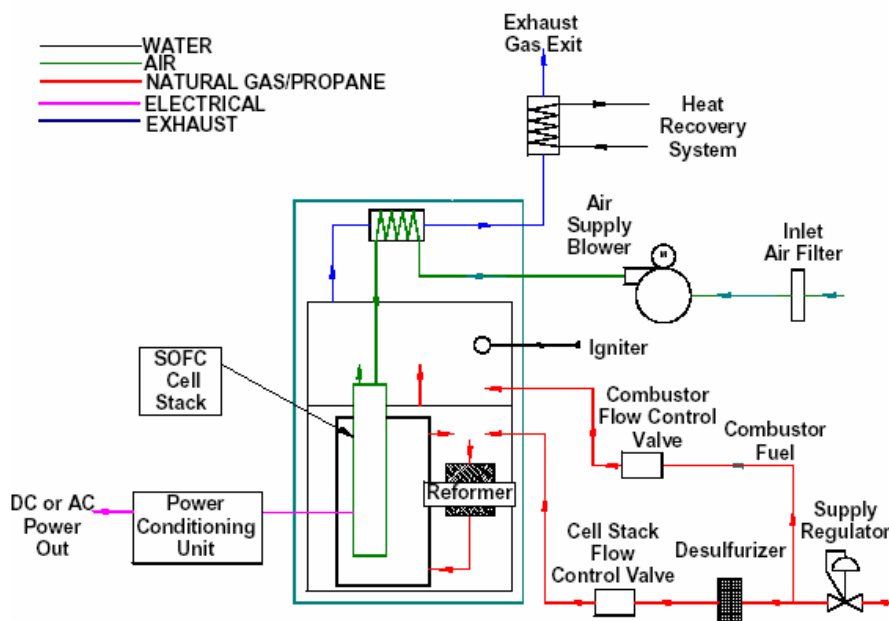


Obrázek 7-6 Jednotka 5 kW demonstračního systému β fy Siemens.

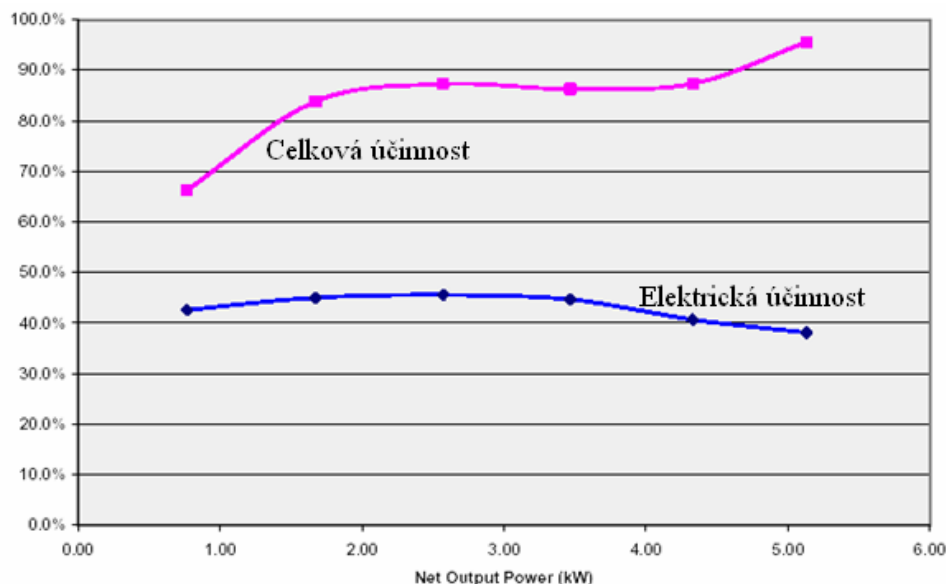
Tabulka 7-2 Základní specifikace 5kW β demonstračního systému fy Siemens

Základní parametry jednotky	
Rozměry	1 170 x 820 x 2 090 mm
Hmotnost	1 000 kg
Elektrický výkon	1 až 5 kW
Tepelný výkon článku	6 kW
Účinnost elektrická	42 % při el. výkonu 3 kW
Účinnost celková	85% při el. výkonu 3 kW
Palivo	Zemní plyn, vodík, metan
Servisní intervaly	6 měsíců

Součástí demonstrační jednotky β je také systém cleaner, který je použit z důvodu prevence oxidace materiálu anody a zabránění možnosti vzplanutí směsi paliva a vzduchu v prostoru článků na straně palivového plynu. Tento systém používá roztok metanolu a demineralizované vody, jež je uskladněn v 10 l nádobě. Tento roztok je dodáván pumpou do elektricky vytápěného vyvíječe páry a dle potřeby dávkován do prostoru stacku.



Obrázek 7-7 Schéma 5 kW demonstračního systému typu Beta fy Siemens

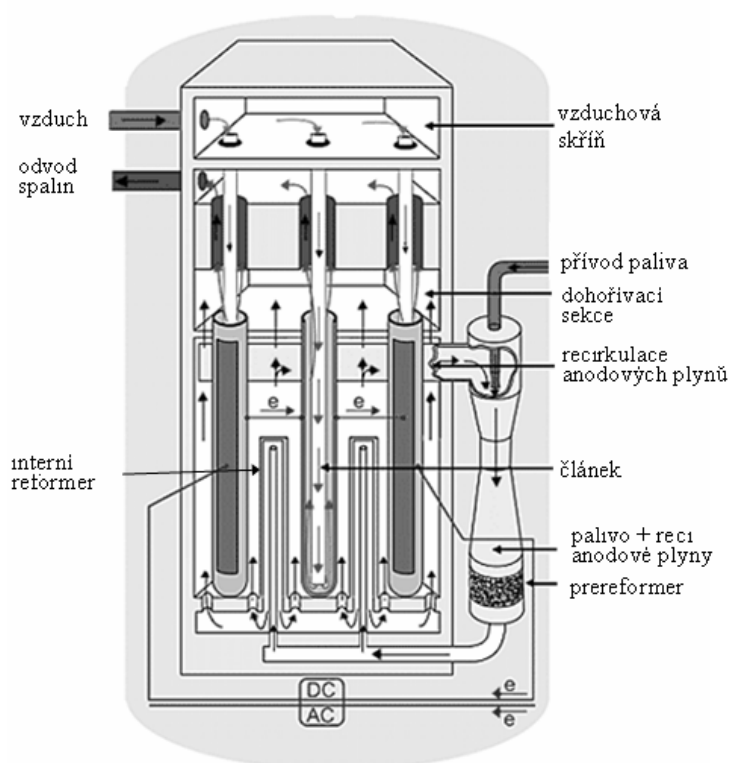


Obrázek 7-8 Průběh celkové a elektrické účinnosti 5kW demonstračního systému typu Beta fy Siemens v závislosti na výkonu jednotky.

Princip práce jednotky SOFC typu tubular je množné popsat následovně, viz. obrázek 7-9.

Vzduch je přiváděn přes vnější ohříváč vzduchu, ve kterém je ohříván spaliny vystupujícími z palivového článku. Na výstupu z ohříváku má vzduch teplotu cca 600°C a injektorovou keramickou trubicí je dále zaveden do spodní části vlastní katodové části trubice článku (dovnitř trubky).

Reformované palivo vystupuje z interního reformeru o teplotě cca 700°C a je přiváděno do prostoru anod článků. Zde již probíhá výše popsáný elektrochemický děj.



Obrázek 7-9 Schéma systému trubkového SOFC s autotermním reformingem.

Díky exotermnímu průběhu reakce je teplota palivového článku udržována v rozsahu 950 až 1 000 °C. Je zde nutno brát v úvahu i odvod tepla sáláním k externímu reformeru, kde je reakce endotermní. Produkty reakce, tj. odpadní plyny, a dále pak nezregované palivové plyny tj. produkty reformingu vodík a oxid uhelnatý, které se nestačily zúčastnit reakce na článku, jsou odváděny z prostoru anody do tzv. **recirkulační komory**, zóny, přes oddělenou porézní stěnu. Část těchto plynů je injektorem nasávána do čerstvého toku primárního energetického plynu. Tímto se teplota vytvořené směsi plynů ustálí na cca 700°C. Touto takzvanou recirkulací anodových plynů je zaručeno zvýšení stupně využití paliva, jehož hodnota se u současných konstrukcí pohybuje okolo 85%.

Produkt reakce, kterým je vodní pára, slouží jako nezbytná součást předřazeného externího prereformingu (podíl asi 10 až 20% na celkovém reformingu), dále potom ve vlastním interním reformingu. Interní reformer je umístěn mezi vlastními svazky článku a je vytápěn reakčním teplem reakce, především sáláním povrchu trubek.

Anodový plyn (odpadní směs plynů) z recirkulační komory, který nebyl recirkulován ejektorem do přírodního primárního plynu, je přes další porézní stěnu přiváděn do dospalovací komory, kde jsou tyto nespotřebované reakční plyny při teplotě cca 850°C a přebytku vzduchu $\lambda = 4$ až 5 téměř dokonale spáleny.

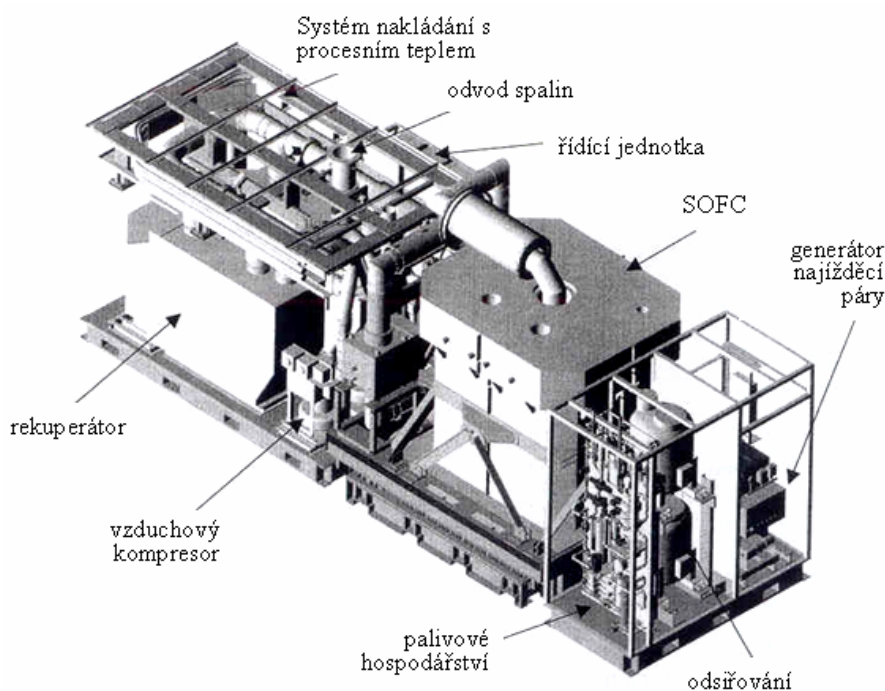
8 JEDNOTKY O VÝKONECH ŘÁDU DESÍTEK AŽ STOVEK KW

8.1 Sofistikované systémy s vysokoteplotními palivovými články

U palivových článků SOFC mají vystupující spaliny, z důvodu vysoké pracovní teploty palivového článku, vysokou teplotu. Jak již bylo zmíněno, tohoto vysokopotenciálního odpadního tepla plynů odcházejících z vysokoteplotních palivových článků je možné využít, jednak primárně k reformování palivových plynů a ohřevu reakčního vzduchu, ale i v externích okruzích k ohřevu topné vody v objektu, u větších výkonů pak zařazením parního Rankin-Clausova cyklu s parní turbínou.

Dále se nabízí možnost využití tohoto tepla v přidružených procesech, jako zplyňování biomasy, případně uhlí, a obecně k přímým i nepřímým ohřevům pomocí výměníků tepla.

Na obrázku 8-1 je znázorněn kogenerační systém jednotky SOFC fy SiemensWestinghouse pracující ve zkušebním provozu v Holandsku, tento systém je sponzorovaný skupinou Dutch and Danich.



Obrázek 8-1 Schématické uspořádání jednotky $P_{el} = 125 \text{ kW}$ fy Siemens Westinghouse, pracovní tlak atmosférický, elektrická účinnost $\eta_{el} = 46\%$

U systémů pracujících za tlaků blízkých atmosférickému tlaku je toto teplo možné využít ve zmíněném parním kotli k výrobě další elektrické energie a zvýšení tak elektrické účinnosti systému. Zbylého nízko-potenciálního odpadního tepla lze použít k různým ohřevům a topením.

Integrace souborů vysokoteplotních palivových článků a využití jejich odpadního tepla jsou velmi důležité k dosažení celkové vysoké účinnosti systému.

Vysokoteplotní palivové články mají výhodu ve vysokopotenciálním charakteru tepla spalin. Systémy s vysokoteplotními palivovými články jsou obecně vhodné ke kogeneraci elektrické energie a středně či vysokopotenciálního tepla. Zavádění efektivních menších jednotek, vyrábějících pro místní potřebu elektrickou energii a teplo, povede v budoucnosti k větší decentralizaci zásobování elektrickou energií a teplem.

U konstrukcí palivových článků typu SOFC, které pracují za zvýšeného tlaku, je možné využít energie horkých stlačených plyných produktů reakce v SOFC článku k expanzi v plynové turbíně, v případě dostatečné teploty plynů po expanzi v turbíně také dále v parním kotli s návaznou parní turbínou. Vyšší provozní tlak vede k vyššímu pracovnímu napětí na článku při stejné proudové hustotě v elektrickém obvodu SOFC. Schéma hybridního energetického zařízení se souborem palivových článků typu SOFC, plynovou a parní turbínou, je znázorněno na obrázku 8.4. Příslušná jednotka je zobrazená na obrázku 8.3.

Hybridní jednotky tohoto typu jsou schopny přeměňovat $60 \div 70\%$ energie paliva (vyjádřené výhřevností) na elektrickou energii.

Na obrázku 8-2 je znázorněná prekomerční jednotka firmy Siemens Westinghouse s označením SFC-200 Series. Její elektrický výkon je 125 kW, tepelný potom 100 kW. Elektrická účinnost při jmenovitém výkonu je 46%. Jedná se o klasickou konstrukci pro vyšší výkony SOFC, prozatím jedinou konstrukcí článku SOFC ve fázi polokomerčních aplikací, konstrukcí tubular (trubková koncepce). Konstrukčně je jednotka řešená bez vlastních těsnění, což minimalizuje vnitřní napětí v konstrukci vlivem teplotní roztažnosti materiálů článku. Pracovní teplota je uváděna cca 1000°C. Vnitřní recirkulace anodových plynů podporuje reformování zemního plynu a jiných uhlovodíků.



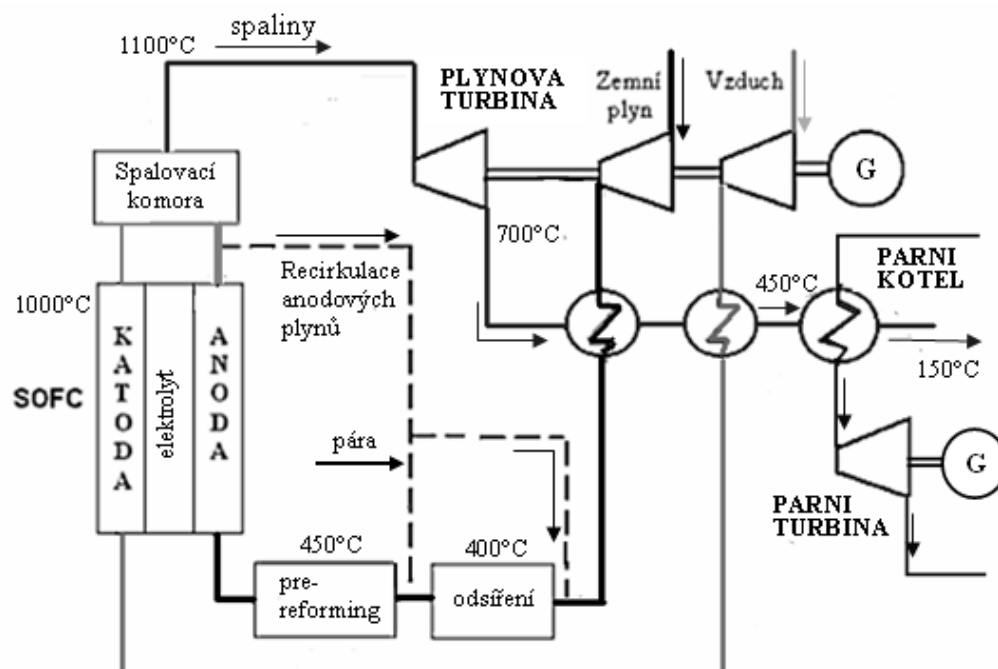
Obrázek 8-2 Jednotka SFC-200 Series fy Siemens Westinghouse.

Jak je uváděno výrobcem, je pokles dosahovaného výkonu, tj. degradace článku s dobou provozu v řádu 0,1% P_{el} za 1000 hodin provozu. Za pět let pak tedy méně než 4,5%. Pro nájezd ze studeného stavu je jednotka vybavena systémem produkce vodní páry pro reformování paliva. Po najezení jednotky na odpovídající teplotu a výkon je tento systém odstaven a jednotka je díky

vnitřní recirkulaci anodových plynů soběstačná. Během provozu již jednotka nevyžaduje výrobu páry a tedy ani spotřebu vody.



Obrázek 8-3 Jednotka SCE 220 kW SOFC/GT Hybrid Power System. Hybridní systém SOFC se spalovací turbínou, jednotka $P_{el} = 220 \text{ kW}$ fy Siemens Westinghouse, pracovní přetlak 3 bar, elektrická účinnost jednotky $\eta_{el} = 57\%$.



Obrázek 8-4 Schéma hybridního systému SOFC se spalovací turbínou a parním cyklem.

9 MOŽNOSTI VYUŽITÍ VYSOKOPOTENCIÁLNÍHO TEPLA SPALIN SOFC PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

9.1 Zapojení do vytápěcí soustavy obytné budovy, rodinného domku

Jednotky SOFC jsou vhodné pro použití v kogeneračním provozu v obytných budovách. Jejich nespornou výhodou oproti jiným konstrukcím je možnost přívodu zemního plynu jakožto palivového plynu s jeho následným reformingem. Výhodou SOFC článků je vysokopotenciální charakter odpadního tepla, jehož je dále využito v topném systému budovy. Elektrický výkon pokrývá vlastní spotřebu objektu, s případným předáváním přebytků do elektrické sítě. Pro uvažované výkonové řady je zde možná aplikace pouze palivového článku v kogeneračním provozu s využitím tepelné energie pro topné účely. Elektrický výkon takovýchto soustav je možno předpokládat v řádu jednotek výjimečně desítek kW, výkon tepelných soustav je u většiny konstrukcí tvořen odpadním teplem z vlastního článku a výkonem podpůrného topného systému.

Provoz vysokoteplotního palivového článku vyžaduje určitá opatření ve vlastním provozu, jež musí být respektována a zohledněna v návrhu a vlastním zařazení této jednotky do dané teplotní soustavy. Především je nutnost respektovat dynamické charakteristiky článku a také dobu jeho nájezdu na požadované parametry. Jedná se o najetí jednotky na provozní parametry a to především teplotní. Jednotka musí být nahřívána s určitým trendem, především z ohledem na použité materiály aktivních členů, pevných oxidů. Dle informací výrobce Siemens Westinghouse je doba najíždění výše popsaného 5 kW demonstračního systému β cca 24 hodin.

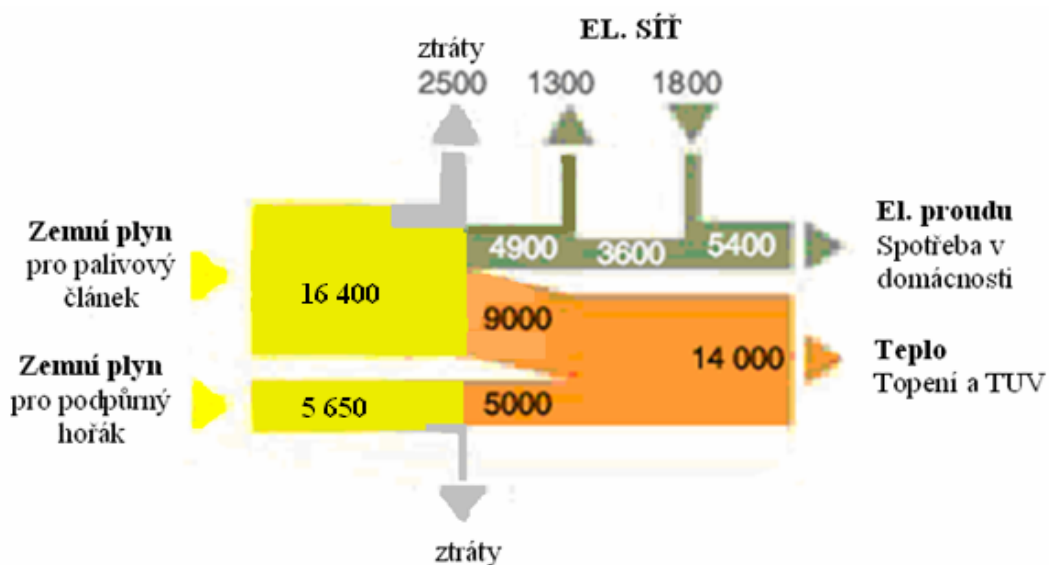
Změny výkonu teplého palivového článku jsou dle údajů výrobců pro požadavky teplotního provozu jednotky v rodinných domech vyhovující. Srovnání výkonové dynamiky provozu vysokoteplotního palivového článku s plynovým kotlem je však jednoznačné v neprospěch vysokoteplotního palivového článku. Teplotní akumulace systému palivového článku je tady zřejmá.

Z těchto informací je zřejmé, že systém palivového článku určený pro kogenerační provoz v obytné budově, vytápění objektu a zásobování teplou užitkovou vodou a výrobu elektrické energie, musí obsahovat akumulární člen, který vyrovná výkyvy v odběru tepelné energie a umožní tak provoz palivového článku v odpovídající výkonové hladině. Důvodem udržování výkonu článku v určitém pásmu je jednak problematika výroby elektrické energie, její transformace a předávání do elektrizační soustavy, dále pak je to již zmíněný důvod teplotních změn na aktivních členech palivového článku. Zamezení cyklických teplotních pnutí v článku zaručuje jeho delší životnost.

Najížděcí hořák slouží pro vlastní najíždění jednotky. Další jeho funkcí je pokrytí špiček v odběru tepelné energie. V případě minimálního odběru tepelné energie slouží k pokrytí tohoto okamžitého odběru.

V mnoha aplikacích je podpůrný hořák dimenzován na pokrytí většiny spotřeby tepelné energie budovy, palivový článek je potom dimenzován na pokrytí spotřeby elektrické energie. Vysokopotenciální teplo spalin palivového článku tvoří např. jen cca 10% celkového tepelného výkonu článku. Pro volbu výkonu článku jsou rozhodující faktory způsobu nakládání

s elektrickou energií, a dále potom možnost zapojení článku do otopné soustavy a využití tepelné energie. Příklad toků energií v případě aplikace palivového článku pro rodinný dům je znázorněn na obrázku 9-1.

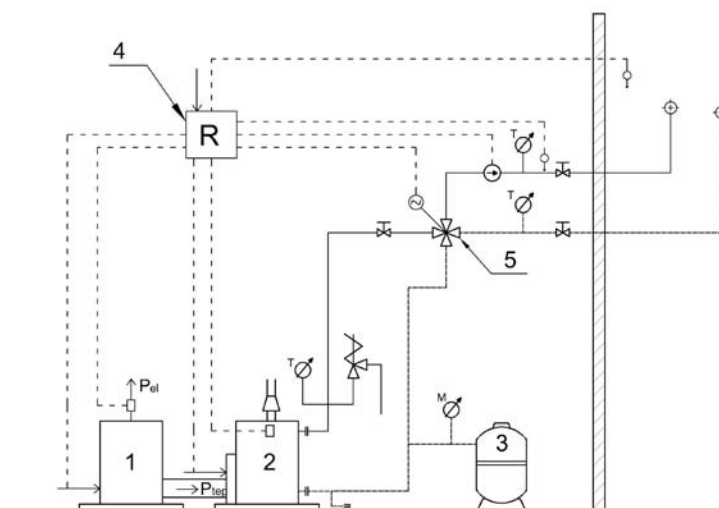


Obrázek 9-1 Příklad toků energií pro jednogenerační dům, údaje jsou v kWh (4 osoby, 1 rok).

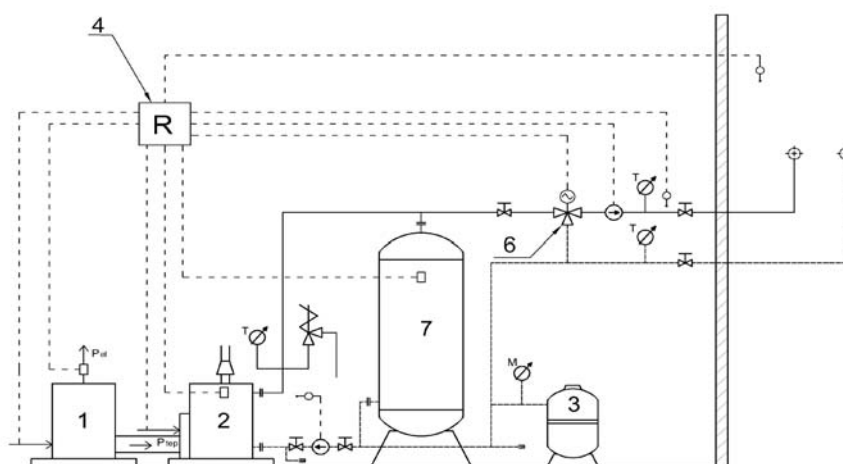
Základní možnosti implementace vysokoteplotního palivového článku do topné soustavy obytné budovy jsou uvedeny na obrázcích 9-2 až 9-4.

Legenda k obrázkům 9-2 až 9-4

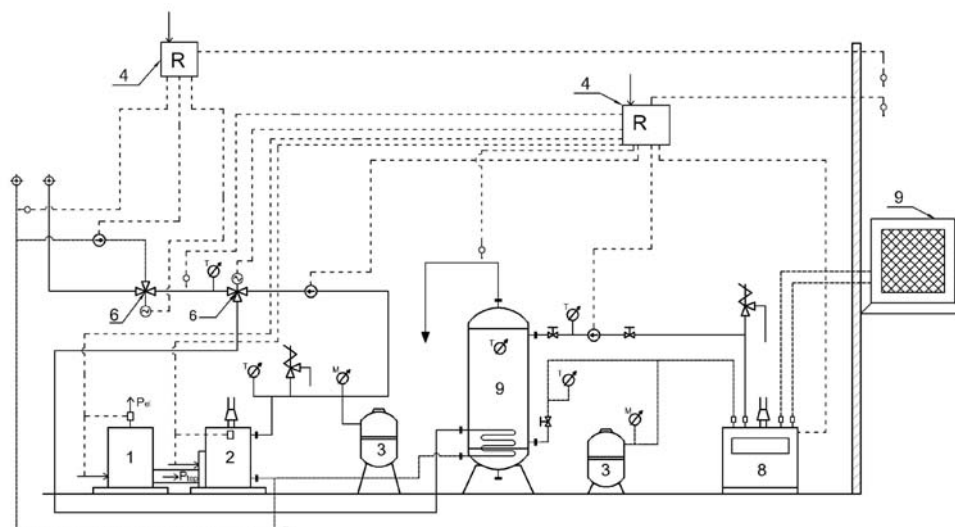
- 1 Palivový článek
- 2 Podpůrný zdroj, akumulární člen
- 3 Expanzní nádoba
- 4 Regulátor
- 5 Čtyřcestná armatura
- 6 Trojcestná armatura
- 7 Akumulační nádrž
- 8 Venkovní výměník tepla s nemrznoucí směsí
- 9 Zásobník TUV



Obrázek 9-2 Příklad tepelného zapojení vysokoteplotního palivového článku do soustavy vytápění s ekvitermní regulací teploty topné vody čtyřcestným směšovačem s ovládáním zdroje tepelného příkonu systému palivového článku. Zapojení vhodné pro jednotky palivových článků integrovaných s podpurným topným systémem a akumulacním členem.



Obrázek 9-3 Příklad tepelného zapojení vysokoteplotního palivového článku do soustavy vytápění s ekvitermní regulací teploty topné vody, s automatickým dobíjením a vybíjením akumulacní nádrže.



Obrázek 9-4 Tepelné zapojení vysokoteplotního palivového článku do soustavy vytápění, se sériovým provozem s tepelným čerpadlem pro ohřev TUV.

9.2 Aplikace vysokoteplotních palivových článků do vytápěcích soustav obytných celků

V případě aplikací palivových článků SOFC do obytných celků máme na mysli výkonové aplikace v řádu stovek kW.

V současnosti je k dispozici jednotka ve fázi prekomerční aplikace vyráběna firmou Siemens Westinghouse označována SFC-200 Series, viz. obrázek 8-2. Její elektrický výkon je 125 kW, tepelný potom 100 kW. Elektrická účinnost při jmenovitém výkonu je 46%.

9.3 Aplikace Rankin-Clausiova oběhu

Využití tepelného obsahu spalin vysokoteplotního palivového článku v Rankin-Clausiově oběhu přináší zvýšení celkové elektrické účinnosti systému. U výkonové hladiny nad 100 kW je již ekonomicky odůvodnitelné využití odpadního tepla spalin, tedy nejen pro přímou aplikaci k topným účelům. Skýtá se tedy možnost vřazení parního okruhu Rankin-Clausiova cyklu, čímž dochází ke zvýšení elektrické účinnosti systému.

Jednotka SCE 220 kWe SOFC/GT Hybrid Power System, viz. obrázek 8-3, jež časem taky s největší pravděpodobností dosáhne statutu jednotky prekomerční, je vhodná taktéž k teplárenskému provozu, a díky své účinnosti i k provozu elektrárenskému. Tento hybridní systém SOFC se spalovací turbínou, má elektrický výkon $P_{el} = 220$ kW, pracovní tlak 3 bar, a elektrickou účinnost $\eta_{el} = 57\%$. Je zde využívána energie odpadních plynů, a to i tlaková v plynové turbíně. V zařazeném parním okruhu Rankin-Clausiova cyklu je využívána také tepelná energie odpadních plynů.

Zapojení těchto systémů do toplogrénského modulu je možné především v paralelním provozu a to s energetickými jednotkami o vhodné dynamice provozu. Palivový člunek SOFC je nutno v soustavě považovat za základní zdroj.

10 STUDIE MOŽNOSTÍ APLIKACE DEMONSTRAČNÍ LABORATORNÍ JEDNOTKY S PALIVOVÝM ČLÁNKEM TYPU SOFC V LABORATOŘI PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ VŠB-TU OSTRAVA

V předchozích odstavcích byla shromážděna základní data o vyvíjených konceptech SOFC a dále základních poloprovozních aplikacích systémů s palivovými články typu SOFC. Tato data slouží pro vytvoření názoru na možný výběr budoucí laboratorní aplikace. Předběžně pro demonstrační laboratorní provoz připadají v úvahu výkonové aplikace v řádu do 10 kW, a to nejen z důvodů finančních, viz. následující rozvaha. Dále je nutno uvážit, zda zvolit aplikaci překomerční v kompaktním provedení, nebo jednu z vyvíjených zkušebních čistě laboratorních aplikací.

10.1 Implementace laboratorní jednotky SOFC do systému vytápění, resp. přípravy TUV, pro budovu Krásnopolská č.p. 86

Jedním z cílů této publikace je definování energeticky nejvhodnějšího způsobu implementace demonstrační laboratorní jednotky s palivovým článkem typu SOFC do tepelné soustavy budovy Krásnopolská 86. Součástí budovy Krásnopolská 86 je budova kotelny s nově budovanou laboratoří palivových článků VŠB-TU Ostrava. Právě laboratoř palivových článků je předpokládaným záměrem umístění této jednotky. Navržená varianta uspořádání by pak měla splňovat základní požadavky na nejvyšší možný energetický potenciál zužitkování energií v systému. Východiskem pro tento návrh je především energetický audit budovy.

Pracovní cyklus palivového článku bude přizpůsobován požadavkům laboratorního provozu této jednotky, je tudíž nutno energetické zapojení této jednotky posuzovat i z tohoto hlediska. Z tohoto důvodu musíme uvažovat s nutností instalace zdvojeného zdroje energie, provozovaného paralelně s jednotkou s palivovým článkem, dále pak s provozem článku v rámci laboratorních testů bez možnosti odběru tepelné energie topným systémem objektu.

Velice důležitý je samozřejmě aspekt výběru vlastní varianty SOFC a výrobce. S tím je spojena i volba výkonu jednotky, jež by z části měla respektovat požadavky na implementaci do zmíněného energetického systému budovy.

Základní však zůstává laboratorní a edukační účel jednotky.

Zapojení jednotky do energetického systému budovy má tedy nejen za cíl využití energie odpadních plynů článku, ale i vybudování demonstračního systému, který laické veřejnosti přiblíží možnosti použití této technologie v aplikacích kombinované výroby elektrické energie a tepla pro případné vytápění objektu a ohřev teplé užitkové vody.

Přípravné práce byly započaty stanovením základních energetických parametrů budovy vycházejících z jejího energetického auditu. Na základě výsledků tohoto auditu probíhalo posuzování možnosti uplatnění tepelného výkonu jednotky s palivovým článkem.

Hlavním cílem energetického auditu je nalezení potenciálu úspor energií daného objektu, návrh možných variant energetických úsporných opatření a jejich posouzení z hlediska

energetického a ekonomického. Pro samotnou cenu vlastního palivového článku se jeví vyhodnocování ekonomických parametrů soustavy s vlastním článkem jako neúčelné. Jedná se o jednotky laboratorní, vesměs kusové výroby a tudíž i vysoké ceny, která samozřejmě v budoucnu při rozšíření této technologie do komerčních aplikací prudce poklesne. Dále samotný laboratorní provoz laboratorní jednotky podmiňuje nutnost realizace řešení, která jsou pro aplikace palivových článků v obytných budovách zbytečná, neboť plně dostačují současné technologie typu plynový kotel. Máme na mysli řešení, kde celek je vybaven podpůrným systémem výroby tepla a akumulacním členem.

Vlastní umístění jednotky palivového článku typu SOFC je v objektu budovy kotelny, přesněji v místnosti bývalé uhelny, ve které v současné době probíhá přestavba na laboratoř palivových článků. Samotná kotelna na tuhá paliva byla rekonstruována na zemní plyn. V místě původních kotlů na tuhá paliva jsou instalovány dva kondenzační plynové kotle, každý o jmenovitém výkonu 60kW/118kW. Je tedy na místě předpokládaného umístění článku k dispozici přípojka zemního plynu, jakožto paliva pro jednotku s SOFC článkem. Budova kotelny je samostatným objektem, který je spojen podzemním energokanálem s vlastním objektem budovy Krásnopolská č.p. 86. Budovy se nachází v těsné blízkosti (cca 3 m).

Co se týče prostoru nutného pro umístění dané aplikace, není zde zásadní problém. Taktéž otázka bezpečnosti provozu této laboratorní jednotky prostřednictvím fyzického oddělení, jednak od vlastní budovy a dále oddělením stěnou od vlastní plynové kotelny, je velice dobře řešitelná.

Základní údaje o spotřebě energií budovy jsou znázorněny v tabulce 10-1.

Základními zdroji tepla jsou plynové kotle 2x 60kW / 118kW.

Rozvod tepla pro ústřední vytápění je zajišťován teplou vodou regulovanou ekvitermním regulátorem. Plynová kotelna slouží celoročně pro dodávku a ohřev TUV.

Výstupy z rozdělovače kotelny jsou následující:

- do hlavní budovy, ekvitermně regulovaná voda,
- do laboratoře, ekvitermně regulovaná voda,
- pro ohřev teplé užitkové vody, bez ekvitermní regulace.

Pro otop vlastní kotelny je použito plynové teplovzdušné topidlo o výkonu 3kW.

Příprava teplé užitkové vody (TUV) je realizována topnou vodou z kotelny, ohřevem v horizontálně uloženém bojleru uvažované budovy. V budově jsou umístěny také akumulátorové ohřívače vody pro potřeby kuchyně. Systém bojleru TUV, ohřívajícího z kotelny, nemá provedenou cirkulaci. Z toho důvodu je na druhém konci budovy vložena voda i po několikaminutovém odpouštění.

V období mimo topnou sezónu se jeví provoz kotelny z pohledu auditu jako velmi ne hospodárny. Přestože nedochází k odběru TUV, mají kotle nezanedbatelnou spotřebu zemního plynu na udržování potrubí a bojleru v teplém stavu, a to i bez cirkulace v systému TUV.

Tabulka 10-1 Základní toky energií pro budovu Krásnopolská č.p. 86

Měsíc	Spotřeba vody		Spotřeba plynu	
	celkem	teplá	Objem plynu	Energie plynu
	m ³	m ³	m ³	GJ
1	108	32,4	2925	99,6
2	121	36,3	3720	126,7
3	171	51,3	3421	116,5
4	205	61,5	2489	84,7
5	188	56,4	475	16,2
6	92	27,6	278	9,47
7	0	0	281	9,57
8	0	0	326	11,1
9	0	0	1872	63,74
10	95	28,5	2757	93,88
11	170	51	4619	157,3
12	128	38,4	5606	191

Pozn.: Uvažovaná výhřevnost paliva (zemního plynu) použitá pro přepočet objemu plynu na množství tepla obsaženého v tomto objemu v tabulce 10-1 činí 34 MJ/kg.



Obrázek 10-1 Průčelí objektu Krásnopolská č.p. 86 s částí objektu kotelny po levé straně.



Obrázek 10-2 Budova kotelny při objektu Krásnopolská č.p. 86 s bývalou uhelnou (v současné době je úsek uhelny přestavován na laboratoř palivových článků).

Možné varianty zapojení laboratorní jednotky s SOFC článkem do tepelného hospodářství budovy je nutné řešit v závislosti na momentálním možném odběru tepla.

Je nutno zohlednit varianty řešení pro dvě krajní situace, a to:

- pro 100%-ní odběr tepelné energie z článku a jeho energeticky nejvhodnější využití,
- a pro malý či dokonce nulový odběr tepla. Tato varianta samozřejmě může nastat v letních měsících, kdy jednotka s SOFC článkem bude provozována za účelem laboratorního provozu.

Byly studovány různé možnosti využití tepelného potenciálu spalín, odpadních plynů z článku SOFC, a to pro potřeby zmíněné studie možnosti aplikace, umístění této technologie pro výzkumné, demonstrační a osvětové účely v laboratorním provozu v laboratoři palivových článků VŠB-TU Ostrava.

Byly studovány tři základní varianty (alternativy).

První ze studovaných variant je svým rozsahem nejvhodnější pro demonstračně-osvětové účely. Zahrnuje možnost využití tepelného obsahu spalín v Rankin Clausiově parním cyklu. Po důkladné studii shromážděných dat se uskutečnění této varianty jeví jako nereálné. Z mnoha aspektů pro toto rozhodnutí se jeví jako zásadní aspekt parní turbíny. Dostupné minimální výkonové řady parních turbín, dle jednání s širokým spektrem výrobců, se pohybují v oblasti 100 kW. Turbína nižšího výkonu vyrobená na zakázku, a to z hlediska ceny a taktéž i výkonu, jež by mohl být krajně v desítkách kW, neřeší zcela daný problém. Pro tuto variantu by byl požadovaný tepelný výkon palivového článku na úrovni 100 kW. Dostáváme se tedy

k parametrům článků, jež jsou již delší dobu zkoumány ve stavu prekomerčních aplikací u firmy Siemens Westinghouse.

Výkon palivového článku by tedy musel být úměrný požadavkům dané turbíny. Uvažované moduly palivových článků vhodné k instalaci v laboratoři nebudou zdaleka dosahovat těchto parametrů a stávající dostupnost a cena těchto aplikací taktéž hovoří proti této variantě.

Druhou ze studovaných variant je možnost přímého využití tepelného potenciálu odpadního tepla palivového článku pro vytápění budovy. Z hlediska předpokládaného provozu palivového článku, tj. laboratorního provozu a předpokládaného tepelného výkonu, je taktéž tato varianta málo vhodná. Jak již bylo zmíněno, laboratorní provoz jednotky je provozem v mnoha ohledech nezávislým na požadavcích tepelného systému budovy, ve kterém by měla být tato tepelná energie zužitkovávána. Tepelný výkon SOFC článků by pak měl být, z důvodu žádaného přínosu pro tepelnou soustavu a investičních zásahů do stávající otopné soustavy, v řádu desítek kW. Nevýhoda laboratorního provozu jednotky v této variantě a výkonu je pak markantní v letních měsících, kdy tepelný výkon palivového článku by musel být v průběhu dlouhodobých laboratorních testů odváděn do okolí.

Samozřejmě, že v případě provozu palivového článku kopírujícího požadavky odběru tepla soustavou by mohl být tento systém s SOFC článkem zařazen paralelně k stávajícímu zdroji tepla, plynovým kotlům.

Třetí variantou, v rámci které je realizováno sloučení laboratorního a osvětově-demonstračního provozu zařízení, a která se jeví jako nejschůdnější, je varianta provozu jednotky s SOFC článkem o výkonu v řádu jednotek kW a zapojení tepelného výkonu palivového článku do systému TUV s případným odvodem tepelného výkonu do okolí.

V následující části této studie je podrobněji rozpracována třetí varianta, tedy sloučení laboratorního a osvětově-demonstračního provozu jednotky s SOFC článkem o výkonu v řádu jednotek kW.

Provozní stav bez možnosti odběru tepelné energie topným systémem budovy

Je nutno odvést teplo palivového článku odpovídajícím způsobem. Přímé vyvedení spalin vystupujících z jednotky, s ohledem na jejich teplotu, je v daných podmínkách téměř nerealizovatelné. Jako nejvhodnější varianta se jeví možnost použití ochlazování spalin ve výměníku spaliny voda, ve kterém je teplo, odebrané ve vodním okruhu, transportováno k venkovnímu vzduchem chlazenému výměníku voda-vzduch. Výměník voda-vzduch je koncipovaný s nuceným průtokem vzduchu.

Provozní stav s odběrem tepelné energie tepelnou soustavou budovy

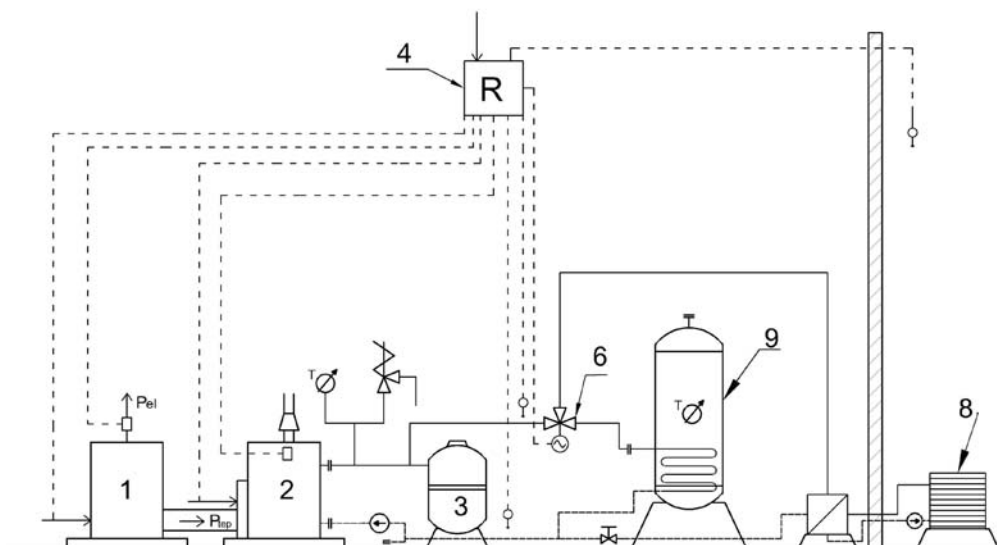
Studie optimálního zařazení jednotky v systému zásobování teplem a její směřování je závislé na předpokládaném výkonu SOFC jednotky. Stanovení tohoto hlavního parametru pro

návrh implementace jednotky do topné soustavy budovy je v současnosti ve fázi návrhů, které vyplývají z jednání mezi danými výrobci systémů SOFC a zástupci VŠB-TU Ostrava, z dostupných variant kompletního řešení systému jednotky SOFC pro obytné budovy, pro kogenerační provoz v kompaktním prekomerčním provedení, jež jsou uvedeny v kapitole 7 této publikace. Dále pak dostupnosti aplikací prozatím čistě laboratorních, taktéž zde komentovaných.

Je však možno s velikou jistotou konstatovat, že výkon jednotky by mohl být, v případě realizace tohoto záměru, v rozsahu od 1 do 10 kW_e.

Musíme též znát výstupní teplotu spalin ze systému SOFC. Ze shromážděných dat výrobců těchto jednotek je zřejmé, že je závislá na daném typu jednotky. Na základě těchto dat můžeme konstatovat, že teplota spalin různých jednotek pohybující se v rozmezí 400 až 650°C..

Je nutno počítat s laboratorním provozem palivového článku. Nelze tedy tento systém považovat za součást energo soustavy budovy, která svůj provoz přizpůsobí požadavkům odběru. Musíme počítat s nutností zdvojení tohoto zdroje. Jako jednou z možných variant je uvažována možnost instalace plynového kotle malého výkonu, který by pracoval výhradně pro ohřev TUV. Tato varianta je plně v souladu se závěry energetického auditu budovy. Palivový článek by pak pracoval paralelně s tímto zdrojem.



Obrázek 10-3 Schéma zapojení laboratorní jednotky s palivovým článkem typu SOFC umožňující práci jednotky ve dvou variantách: (a) varianta provozu s využitím odpadního tepla spalin jednotky v soustavě ohřevu teplé užitkové vody, (b) varianta provozu jednotky s odvodem tepla do okolí.

Byla také předjednána možnost zavedení odpadních plynů z palivového článku, v případě varianty SOFC bez výměníku spaliny voda integrovaného v systému, do spalovací komory plynového kotle, kde by tyto plyny odevzdávaly tepelnou energii topné vodě pro systém TUV.

Bezpečnostní opatření

Aplikace polokomerčních systémů palivových článků zmíněných v předchozích kapitolách, a to 5 kW β demonstračního systému fy Siemens a 1 kW systém Sulzer Hexis, jsou aplikace velice bezpečné. Co se týče hodnocení bezpečnostních rizik, jsou tyto systémy hodnoceny stejně jako plynové motory a vztahují se na ně stejná bezpečnostní opatření a pravidla. Lze říci, že systémy jsou na vysoké úrovni bezpečnosti provozu. V případě instalace jednotky tohoto typu v laboratoři VŠB-TU Ostrava by nebylo nutno počítat s rozšiřováním stávajících bezpečnostních opatření.

V případě instalace jednotky čistě laboratorní a tedy nekomerční, jež není ještě připravená k prodeji, je nutno odpovídajícím způsobem zabezpečit pracoviště a provést opatření proti úniku reakčních plynů. Jelikož tyto konstrukce systému SOFC převážně nejsou v kompaktním celku, je nutno počítat i s výskytem plynů vzniklých reformováním zemního plynu, a to vodíkem a oxidem uhelnatým. Je samozřejmé, že záleží na daném konstrukčním uspořádání jednotky.

Naskytuje se také možnost použití samotného vodíku jako reakčního plynu.

Výbušnost směsi vodíku se vzduchem je známá a provoz v laboratoři pak vyžaduje bezpečnostní opatření ve všech prostorách, kde se s vodíkem manipuluje, zejména pak v prostorách uzavřených. Nízká hustota vodíku oproti vzduchu vyvolává intenzivní promíchávání směsi plynů a tím rychlý vznik velkého objemu výbušné směsi. Vodík je se vzduchem výbušný v širokém rozmezí koncentrací. Je nevyhnutelné použití detektory vodíku, které jsou schopny registrovat již 10% dolní meze výbušnosti směsi vodíku se vzduchem, která je 4% obj., horní mez je potom 75% obj. Detektory musí být připojeny na řídicí jednotku, ze které je veden signál pro inicializaci preventivních opatření, která spočívají především v signalizaci stavu ohrožení, blokování chodu zařízení pracujících s vodíkem, a dále ve startu havarijní ventilace ohrožených prostor.

10.2 Implementace jednotky SOFC do elektrizační soustavy

10.2.1 Současný stav elektroinstalace objektu Krásnopolská č.p. 86

Elektrická přípojka - objekt Krásnopolská č.p. 86 je připojen k rozvodné elektrické síti silovým kabelem AYKY 4B $\times$ 70 mm², délky 72 m. Kabel je zakončen v hlavní domovní skříni objektu Krásnopolská č.p. 86, nacházející se napravo od vstupu do budovy, viz. obrázek 10-4.

Hlavní domovní skříň (HDS) – elektrická přípojka objektu je zakončena v hlavní domovní skříni objektu, viz. obrázek 10-4. V HDS jsou umístěny nožové proudové pojistky 100 A. Z HDS vystupuje silový kabel AYKY 4B $\times$ 70 mm², který je zakončen v rozváděči r-E.

Rozváděč r-E – rozváděč r-E je umístěn v chodbě v přízemí objektu. Rozváděč je osazen hlavním vypínačem objektu (J21U-50-B, 80 A) a elektroměrem ENERMET pro měření vlastní spotřeby objektu. Elektrické schéma rozváděče r-E je znázorněno v příloze A “Elektrické schéma

rozdávěče r-E”. Přívod elektrické energie je proveden silovým kabelem AYKY $4B \times 70 \text{ mm}^2$ s délkou 17 m. Z rozváděče r-E je elektrická energie vyvedena prostřednictvím silového kabelu AYKY $4B \times 70 \text{ mm}^2$ o délce 2 m do rozváděče rms-1. Rozvaděč, a tím i celý elektrický rozvod budovy, je možné odpojit o rozvodné elektrické sítě prostřednictvím hlavního vypínače na vstupu rozváděče r-E.



Obrázek 10-4 Hlavní domovní skříň objektu Krásnopolská č.p. 86.

Rozváděč rms-1 – rozváděč je umístěn vedle rozváděče r-E v chodbě v přízemí objektu. Rozváděč je hlavním rozváděčem budovy. Vedou z něj silové přívody k jednotlivým podružným rozváděčům rms-2 (druhé patro budovy), rms-3 (třetí patro budovy) a r-kot (objekt kotelny). Rozváděč je napájen silovým kabelem AYKY $4B \times 70 \text{ mm}^2$ délky 1 m z rozváděče r-E. Rozvaděč, a tím celý elektrický rozvod budovy je možné odpojit od rozvodné elektrické sítě prostřednictvím hlavního vypínače S100V-01 na vstupu rozváděče.

Podružný rozváděč r-kot – rozváděč je umístěn na jihovýchodní stěně na pravé straně při vstupu do místnosti kotelny v objektu kotelny. K rozváděči rms-1 je připojen kabelem WL 1 typu CYKY $4B \times 10 \text{ mm}^2$ délky 25 m přes proudovou pojistku 25 A umístěnou v rozváděči rms-1. Přívodní kabel WL 1 je veden pod omítkou (pod stropem) a dále na příchýtkách přízemní chodby hlavní budovy Krásnopolská. Následně je veden kanálem v ocelové trubce $\varnothing 65 / 2 \text{ m}$, který spojuje objekt kotelny s objektem hlavní budovy.

10.2.2 Předpokládané umístění jednotky (systému) s SOFC, její připojení do vnitřní elektrické sítě objektu Krásnopolská č.p. 86 a její předpokládané využívání

Na základě rozboru a výběru vhodné varianty provedení jednotky s palivovým článkem typu SOFC v části 10.1 “Implementace laboratorní jednotky SOFC do systému vytápění, resp. Přípravy TUV, pro budovu Krásnopolská č.p. 86” a po posouzení polokomerčních jednotek nabízených v současné době na trhu, budeme předpokládat instalaci jednotky o elektrickém výkonu 5 kW. Vycházejme tedy z předpokladu instalace zdroje obdobného demonstrační jednotce Beta firmy Siemens.

Jednotka s SOFC článkem bude umístěna v místnosti budoucí laboratoře palivových článků v objektu kotelny Krásnopolská č.p. 86, viz. příloha B “*Situační schéma umístění palivového článku v objektu kotelny*”. Předpokládáme umístění v severozápadní části místnosti, co nejbližší místnosti kotelny – krátký přívod zemního plynu a elektrické energie, bezpečnější z hlediska provozu.

Poněvadž se jedná o zdroj, který by měl být použitelný v běžných domácnostech, pro všechny typy spotřebičů, uvažujeme tedy, že výkon je z něj vyveden prostřednictvím třífázového pětižilového kabelu CYKY 5C $\times$ 6 mm² délky 2 m. Tento kabel je ukončen v rozváděči palivového článku r-PC. Situační schéma rozváděče je uvedeno v příloze C. Dále předpokládáme, že zdroj využívá třífázového střídače, vyhodnocujícího určitá kritéria a zajišťujícího odpojení zdroje od elektrické sítě v případě splnění těchto kritérií. Tyto kritéria předpokládáme v následující podobě:

Impedance sítě

- Přesahuje-li impedance sítě v čase připojování zdroje do elektrické sítě maximální stanovenou hodnotu $Z_{AC} = 1,25 \Omega$, není zahájena dodávka elektrické energie ze střídače do elektrické sítě,
- změní-li se impedance sítě ve stanoveném časovém úseku o určitou velikost ($\Delta Z_{AC} = 0,5 \Omega$), nebo překročí-li maximální hodnotu ($Z_{AC} = 1,75 \Omega$) v průběhu dodávky do elektrické sítě, bude zdroj do 5 s odpojen.

Síťové napětí

- Síťové napětí se smí nacházet v rozsahu od -15 % do +10 % jmenovitého napětí sítě U_N . Při překročení či poklesu pod tyto přípustné meze je zdroj odpojen od elektrické soustavy do 0,2 s.

Frekvence sítě

- Síťová frekvence se smí nacházet v rozsahu $\pm 0,2$ Hz jmenovité frekvence soustavy f_N v rozsahu napětí sítě od -30 % do +15 % jmenovitého napětí soustavy U_N . Při překročení či poklesu pod tyto přípustné meze bude zdroj do 0,2 s odpojen od elektrizační soustavy,
- změní-li se hodnota frekvence elektrické soustavy skokem o určitou hodnotu ($\Delta f = 0,2$ Hz) v průběhu dodávky do elektrické sítě, bude zdroj během 0,2 s odpojen od elektrické sítě.

Izolační stav

Kvalita izolace systému je zaručena dvěma vzájemně nezávislými monitorováními:

- Střídač zahájí dodávku elektrické energie do elektrické sítě pouze v případě, je-li izolační odpor vyšší jak $2 M\Omega$,
- v průběhu chodu zařízení je trvale monitorován poruchový proud vůči zemi. Jestliže velikost poruchového proudu přesáhne hodnotu 95 mA, nebo pokud nárůsty či poklesy jeho velikosti budou vyšší jak 30 mA, měnič je do 0,2 s odpojen od elektrické sítě.

Přestože výkon dodávaný jednotkou do elektrické sítě, maximálně 5 kW, je bezproblémový z hlediska připojení jednotky k podružnému rozváděči r-kot, vzhledem k ceně

zařízení a jeho požadované nezávislosti předpokládáme jeho připojení do sítě až v místě rozváděče rms-1. Propojení podružného rozváděče r-PC jednotky s SOFC článkem s rozváděčem rms-1 bude provedeno silovým kabelem CYKY 4B $\times$ 6 mm², jež bude na straně rozváděče rms-1 jištěn pojistkou 10 A, přičemž bude využito stávajících stavebních úprav pro elektrický rozvod objektu kotelny.

Kromě zmíněného propojení může být rozváděč jednotky s SOFC propojen silovým kabelem CYKY 4B $\times$ 6 mm² s rozváděčem r-kot, jež bude taktéž jištěn proudovou pojistkou 10 A. Navíc, v rozváděči r-PC budou ponechána možnost přímého vyvedení výkonu pro možnost laboratorních měření a testů či pro možnost najíždění kotelny v ostrovním režimu s palivovým článkem v případě ztráty napětí v rozváděči r-kot.

Podružný rozváděč jednotky s SOFC článkem r-PC bude umístěn na severozápadní stěně místnosti laboratoře palivových článků v objektu kotelny, vedle zdroje s palivovým článkem. Rozváděč bude osazen elektroměrem pro měření dodávky elektrické energie do vnitřní sítě školy (elektroměr bude vybaven přídatným modulem umožňujícím komunikaci s PC – RS 232) a dále systémem ochran plnící technické požadavky na připojení nového zdroje elektrické energie do elektrické sítě provozovatele distribuční soustavy, viz. tabulka 10-2 či dokument “*Technické podmínky pro připojení nového zdroje do distribuční soustavy*”, kapitola 4 “*Ochrany a automatiky*” vydaný společností ČEZ, SME, a.s.

Tabulka 10-2 Požadované ochrany u zdrojů do 250 kW

Druh ochrany	Osazení fází	Nastavení ochrany
Podpět'ová ochrana	ve všech fázích	0,85 Un; 0,1 s
Nadpět'ová ochrana	ve všech fázích	1,10 Un; 0,1 s
Podfrekvenční ochrana	postačuje v 1 fázi	49,5 Hz; 0,1 s
Nadfrekvenční ochrana	postačuje v 1 fázi	51,0 Hz; 0,1 s
Zkratová ochrana		
Nadproudová ochrana		

První čtyři typy ochran uvedené v tabulce 10-2 jsou zajištěny střídači – viz. strana 111 a 112 této studie. Ochrana zdroje a vnější sítě vůči nadproudu a zkratovému proudu je zajištěna jističi; ochrana proti šíření nepřipustné hodnoty zvýšeného napětí v elektrické síti je zajištěna ochranami proti přepětí. Rozváděč r-PC je vybaven také tlumivkami pro vyhlazení případných “špiček” proudu. Před výstupem elektrické energie z rozváděče r-PC prostřednictvím kabelu CYKY 4B $\times$ 6 mm² je umístěn hlavní vypínač tohoto podružného rozváděče. Blokové schéma rozváděče r-PC je znázorněno v příloze C.

Rozváděč r-PC bude dle předpokladu osazen následujícími prvky (pořadí je dáno elektrickou cestou od zdroje-střídače k hlavnímu vypínači rozváděče r-PC):

Položka	Počet kusů
1. Třífázový jistič LSN-13B/3N	1
2. Elektroměr Actaris + přídatný modul HMP64 – VE8	1
3. Ochrana proti přepětí SALTEK 4×DA-275 V, stupeň III (D)	3
4. Tlumivka RTO63	4
5. Ochrana proti přepětí SALTEK 4×SLP-275 V, stupeň II (C)	4
6. Hlavní vypínač LSN-16B/3N	1

Systém komunikace jednotky s SOFC článkem s PC pro laboratorní účely aplikace bude proveden na základě vzájemné domluvy mezi dodavatelem zdroje a jeho provozovatelem, tedy VŠB-TU Ostrava.

Znázornění obvyklého zapojení jednotky do systému elektrické energie a tepla objektu je znázorněn v kapitole č.7 na obrázku 7-7.

Kvalita elektrické energie dodávané jednotkou do elektrické sítě školy je určena metodou transformace napětí a kvalitou provedení střídačů použitých v jednotce. Tento zdroj musí splňovat požadavky dle dokumentu *“Technické podmínky pro připojení nového zdroje do distribuční soustavy”*, kapitola 3 *“Kvalita dodávané energie”* určené společností ČEZ, SME, a.s.

Vykrývání spotřeby elektrické energie objektu Krásnopolská č.p. 86

Přestože nemáme k dispozici přesný časový průběh odběru elektrické energie objektem Krásnopolská č.p. 86, budeme vycházet z předpokladu časově průměrných hodnot měsíčního zatížení vypočtených na základě hodnot odečtených z elektroměru objektu. Přestože průměrné hodnoty nejsou zcela vypovídající, neboť spotřeba elektrické energie objektu je v průběhu dne velmi proměnlivá s velkými rozdíly zatížení. V dopoledních hodinách může spotřeba elektrické energie vzrůst i více než dvojnásobně oproti hodnotě udávané jako průměr, budeme z těchto hodnot vycházet při srovnávání spotřeby objektu a možného vykrytí této spotřeby předpokládaným palivovým článkem. Průměrné hodnoty elektrické energie odebírané v roce 2004 jsou uvedeny v tabulce 10-3.

Tabulka 10-3 Spotřeba elektrické energie objektu Krásnopolská č.p. 86 a průměrný výkon odebíraný objektem z distribuční elektrické sítě.

Měsíc, rok	Spotřeba elektrické energie objektu, [kWh]	Počet dnů v měsíci, [-]	Průměrný výkon odebíraný objektem z distribuční el. sítě, [kW]
Leden 2004	2 679,5	31	3,601
Únor 2004	3 398,1	28	5,057
Březen 2004	2 592,0	31	3,484
Duben 2004	2 228,2	30	3,095
Květen 2004	2 149,8	31	2,890
Červen 2004	2 929,0	30	4,068
Červenec 2004	2 200,0	31	2,957
Srpen 2004	3 346,1	31	4,497
Září 2004	3 793,9	30	5,269
Říjen 2004	5 095,4	31	6,849
Listopad 2004	3 901,8	30	5,419
Prosinec 2004	4 589,4	31	6,169

V případě dlouhodobých měření s udržovaným trvalým výkonem 5 kW je tento zdroj schopný vykrýt po většinu dne celkovou spotřebu elektrické energie objektu Krásnopolská č.p. 86, a v denních hodinách je schopen pokrýt až polovinu spotřeby i v těch nejnáročnějších měsících.



Obrázek 10-5 Příklad možného použití jednotky 5 kW firem Fuel Cell Technologies Ltd a Siemens Power Generation jako zdroje elektrické energie a tepla pro domácnost (vlevo) a pro podnik (vpravo).

Protože zatím v ČR neexistuje zákon, který by upravoval a vymezoval finanční vztahy vlastníků či provozovatelů zdrojů elektrické energie na bázi čistě palivových článků s provozovatelem elektrické distribuční sítě, musela by být případná dodávka elektrické energie do vnitřní sítě objektu a následně do distribuční elektrické sítě provedena na základě dohody a následné smlouvy obou těchto subjektů. Pokud však na palivový článek pohlížíme jako na kogenerační jednotku pro výrobu elektrické energie a tepla, potom se provozovatel zdroje musí řídit zákonem 458/200 Sb a získat osvědčení na základě vyhlášky MPO č. 439/2005 Sb.

Vzhledem k laboratornímu účelu jednotky s SOFC článkem, k vysokým investičním a provozním nákladům na zakoupení a provoz jednotky a prozatímní neregulovanost výkupní ceny elektrické energie ze zdroje elektrické energie na bázi palivových článků (s odvoláním na předchozí odstavec) není v této studii proveden výpočet ekonomické návratnosti dané investice. Jelikož se jedná zatím o polokomerční aplikace, neměly by ani takové výpočty dostatečnou vypovídací schopnost.

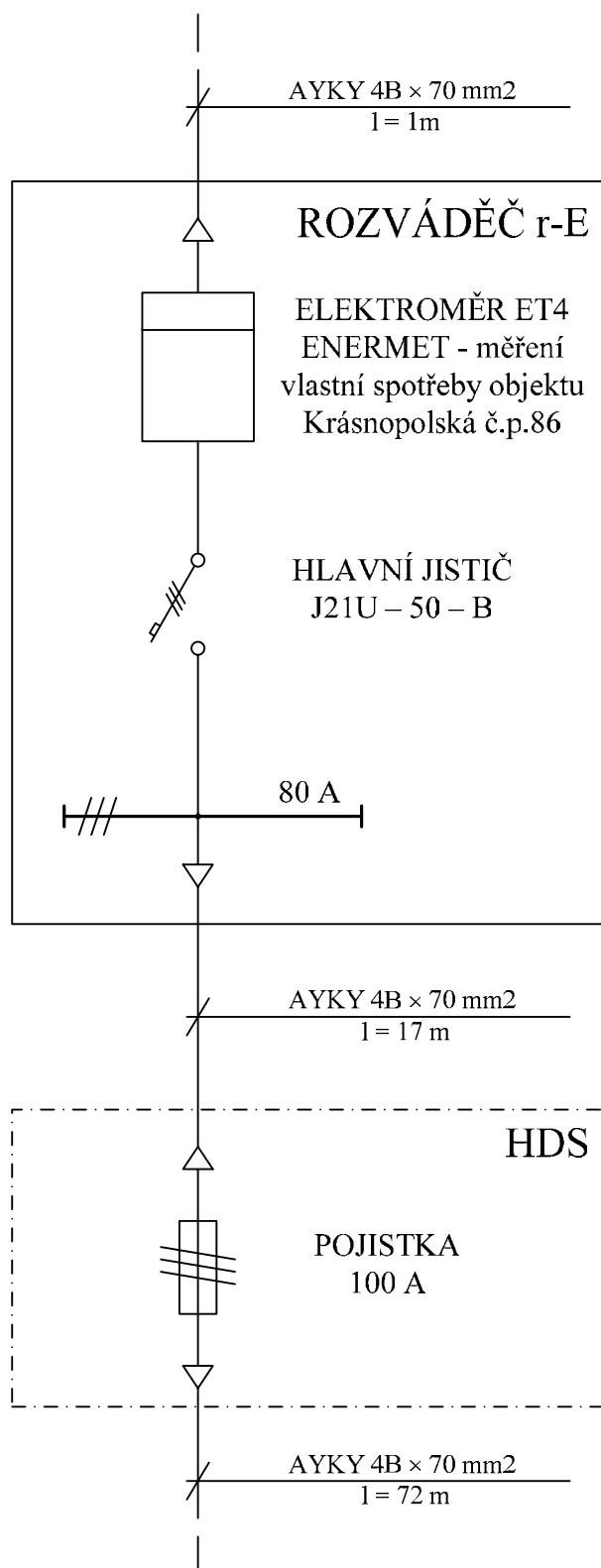
POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY

1. Bieberle A., Gauckler L.J.: *Ni-based SOFC Anodes: Microstructure and Electrochemistry*, Zeitschrift für Metalkunde, 2001, submitted.
 2. Blum L., Peters R.: Zukünftige Einsatz der Brennstoffzelle in der Hausenergieversorgung, Seminař FZJ.
 3. Kim J., Lee S-M., Srinivasan S., a Chamberlin C.E.(1995) "Modeling of proton exchange membrane fuel cell performance with an empirical equation", *Journal of the Electrochemical Society*, 142(8), 2670-2674.
 4. Larminie J. a Dicks A.: *Fuel Cell Systems Explained, Second Edition*, John Wiley and Sons Inc., Chichester, 2003, ISBN 0-470-84857-X.
 5. Laurencelle F., Chahine R., Hamelin J., Fournier M., Bose T.K., a Laperriere A. (2001) "Characterization of a Ballard MK5-E proton exchange membrane stack", *Fuel Cells*, 1(1), str. 66-71.
 6. Ledjeff-Hey.: *Brennstoffzellen*, C.F.Müller Verlag, 2001.
 7. Spiegel R. J., Gilchrist T a House D. E. (1999) "Fuel cell bus operation at high altitude", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A*, 213, 57-68.
 8. Steionberger-Wilekens R.: Schlüsseltechnologie für die Zukunfftige Energieversorgung, Physikalische Kolloquium der Carl von Ossietzky – Universität Oldenburg, 2003,
 9. Walters D. (1999) "Energy efficient motors, saving money or costing on the earth?", *Power Engineering Journal*, Part 1, 13(1), 25-30, Part 2, 13(2), 44-48.
 10. ČEA - zpráva Enviros, s.r.o.: Palivové články – progresivní technologie pro ekologickou výrobu energie, říjen 2003
-
- a) www.fct.ca
 - b) www.hexis.com/eprise/SulzerHexis
 - c) www.initiative-brennstoffzelle.de
 - d) www.powergeneration.siemens.com/en/fuelcells

PŘÍLOHY

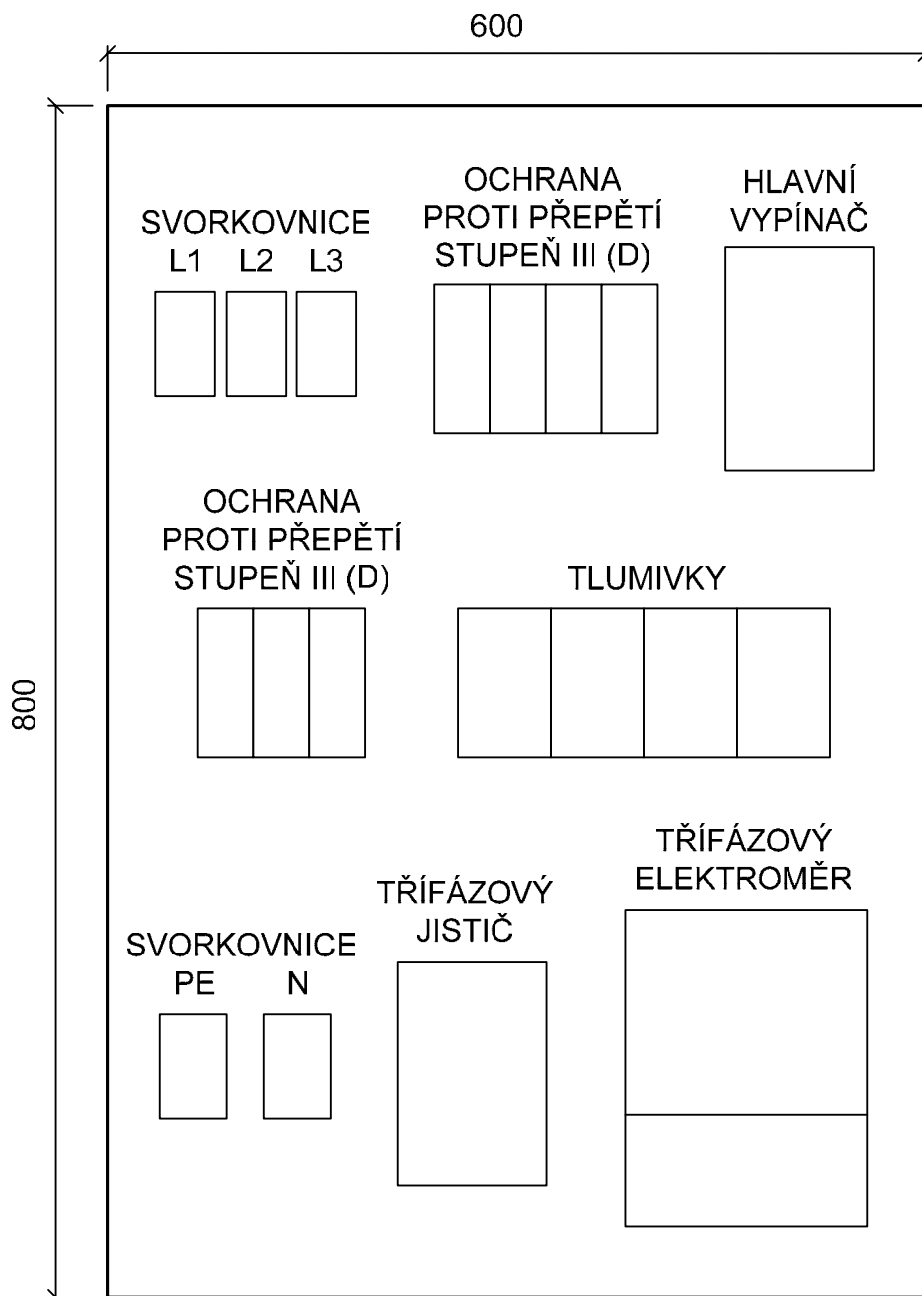
- PŘÍLOHA A: *HDS A ROZVÁDĚČ r-E*
- PŘÍLOHA B: *SITUAČNÍ SCHÉMA UMÍSTĚNÍ PALIVOVÉHO ČLÁNKU V OBJEKTU KOTELNY*
- PŘÍLOHA C: *BLOKOVÉ SCHÉMA ROZVÁDĚČE r-PC*

PUBLIKACE AUTORSKÉHO TÝMU K DANÉ PROBLEMATICE



$P_i = 70 \text{ kW}$
 $P_s = 45 \text{ kW}$
 Upraveno na zaplombování
 Sít': 3PEN ~ 50 Hz; 380 V
 TN-C

VYPRACOVAL: MIROSLAV KOPŘIVA	SCHVÁLIL:	MĚŘÍTKO: -----
INVESTOR: VŠB – TU OSTRAVA, FEI KRÁSNOPOLSKÁ č.p. 86, OSTRAVA- PORUBA		DATUM: 10/2005
NÁZEV: Příloha A HDS A ROZVÁDEČ r-E		LIST / POČET L.: 1 / 1



TECHNICKÉ PODMÍNKY

ROZVODNÁ SOUSTAVA:
3PEN~50Hz 230V/400V/TN-C-S

OCHRANA PŘED ÚRAZEM ELEKTRICKÝM PROUDEM:
DLE ČSN 33 2000-4-41 SAMOČINNÝM ODPOJENÍM OD ZDROJE

UZEMNĚNÍ A OCHRANNÉ VODIČE:
DLE ČSN 33 2000-5-54

UPRAVENO ZAPLOMBOVÁNÍM

VYPRACOVAL: MIROSLAV KOPŘIVA	SCHVÁLIL:	MĚŘÍTKO: -----
INVESTOR: VŠB – TU OSTRAVA, FEI KRÁSNOPOLSKÁ č.p. 86, OSTRAVA- PORUBA		DATUM: 10/2005
NÁZEV: Příloha C BLOKOVÉ SCHÉMA ROZVÁDĚČE r-PC		LIST / POČET L.: 1 / 1